

# Einfuehrung in die Astron. & Astrophysik I

Wintersemester 2013/2014: Henrik Beuther & Christian Fendt

17.10 *Einfuehrung: Ueberblick und Geschichte (H.B.)*

24.10 *Koordinatensys., Sternpositionen, Erde/Mond (C.F.)*

31.10 *Teleskope und Instrumentierung (H.B.)*

07.11 *Strahlung, Strahlungstransport (C.F.)*

14.11 *Planetensystem(e) und Keplergesetze (H.B.)*

21.11 *Sonne & Sterne, Typen, Klassifikationen, HR-Diagramm (C.F.)*

**28.11 Interstellare Materie: Chemie und Materiekreislauf (H.B.)**

05.12 *Sternentstehung, Akkretionsscheiben und Jets (H.B.)*

12.12 *Sternaufbau und Sternentwicklung: Hauptreihe (C.F.)*

19.12 *Sternaufbau und Sternentwicklung: Endstadien (C.F.)*

26.12 und 02.01 –

09.01 *Mehrfachsysteme und Sternhaufen, Dynamik (C.F.)*

16.01 *Exoplaneten und Astrobiologie (H.B.)*

23.01 *Die Milchstrasse (H.B.)*

30.01 *Zusammenfassung (C.F. & H.B.)*

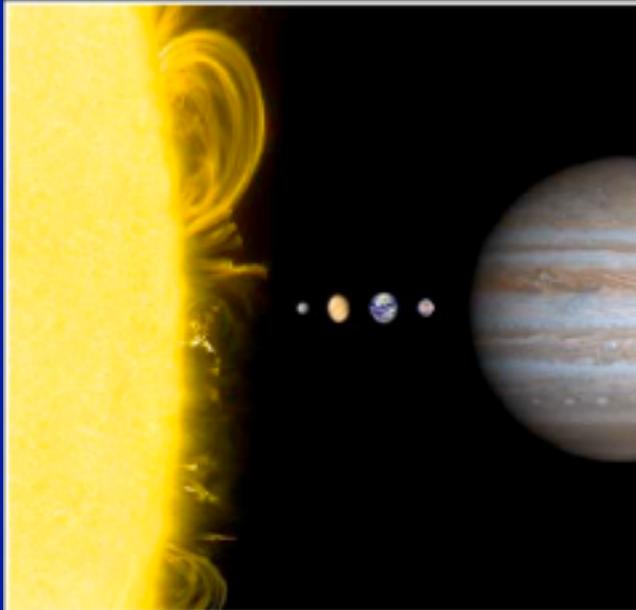
06.02 *Pruefung (C.F. & H.B.)*

# Klausurtermin

Samstag, 8.2.2013, 15:00 – 17:00

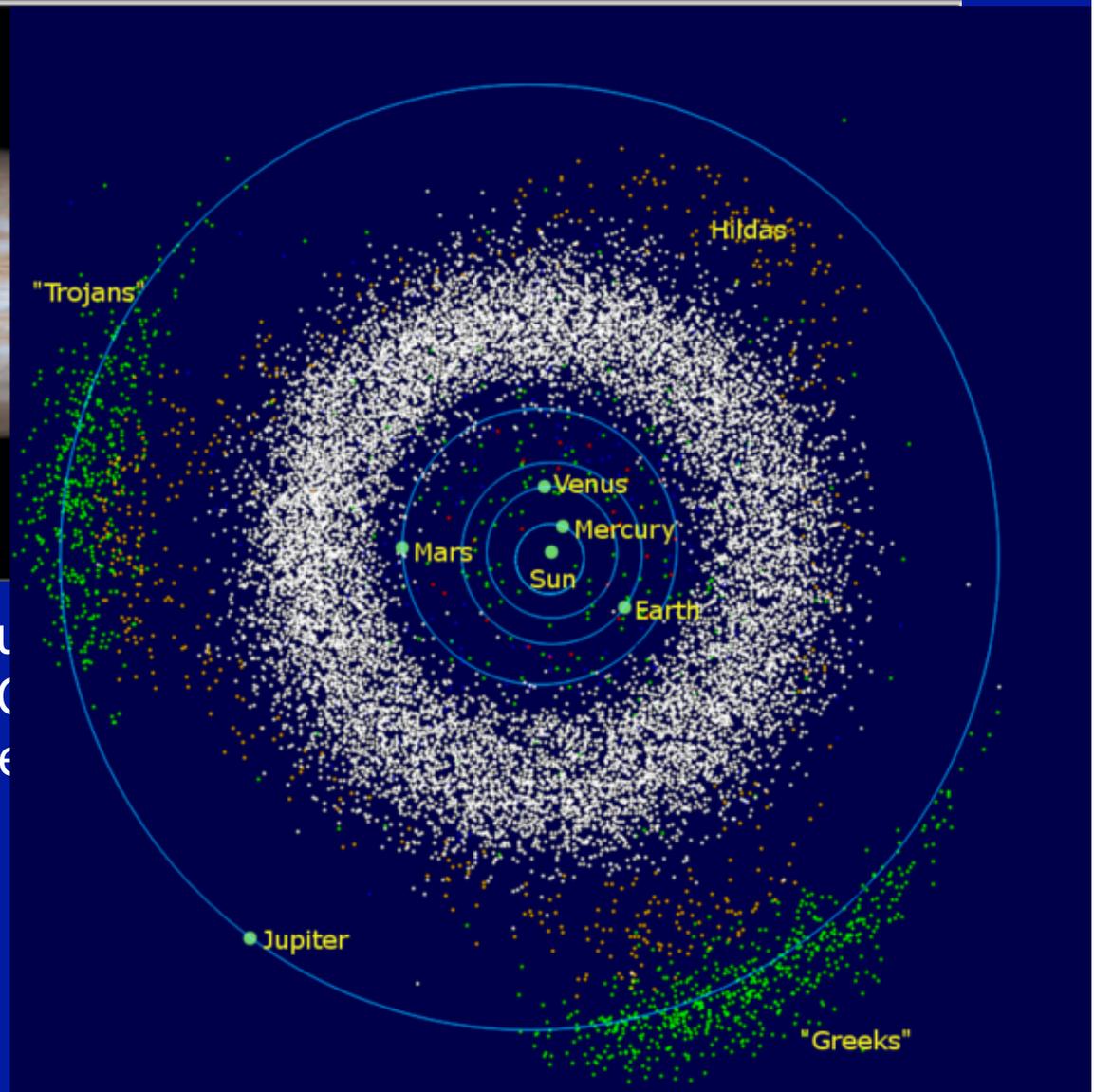
Im Neuenheimer Feld 227, Hoersaal 1 & 2

# Planeten



Definition Planeten: (a) in Umlaufzeit lang genug, dass er hydrostatisches Gleichgewicht hat. (b) Umlaufbahn von anderen Körpern nicht gestört.

Trojaner: Koorbitale Objekte, die Planeten in Bahn voraus- oder hinterherziehen. Im Falle von Jupiter 60 Grad. Jupiter bleibt Planet, da in 1:1 Resonanz.



# Themen heute

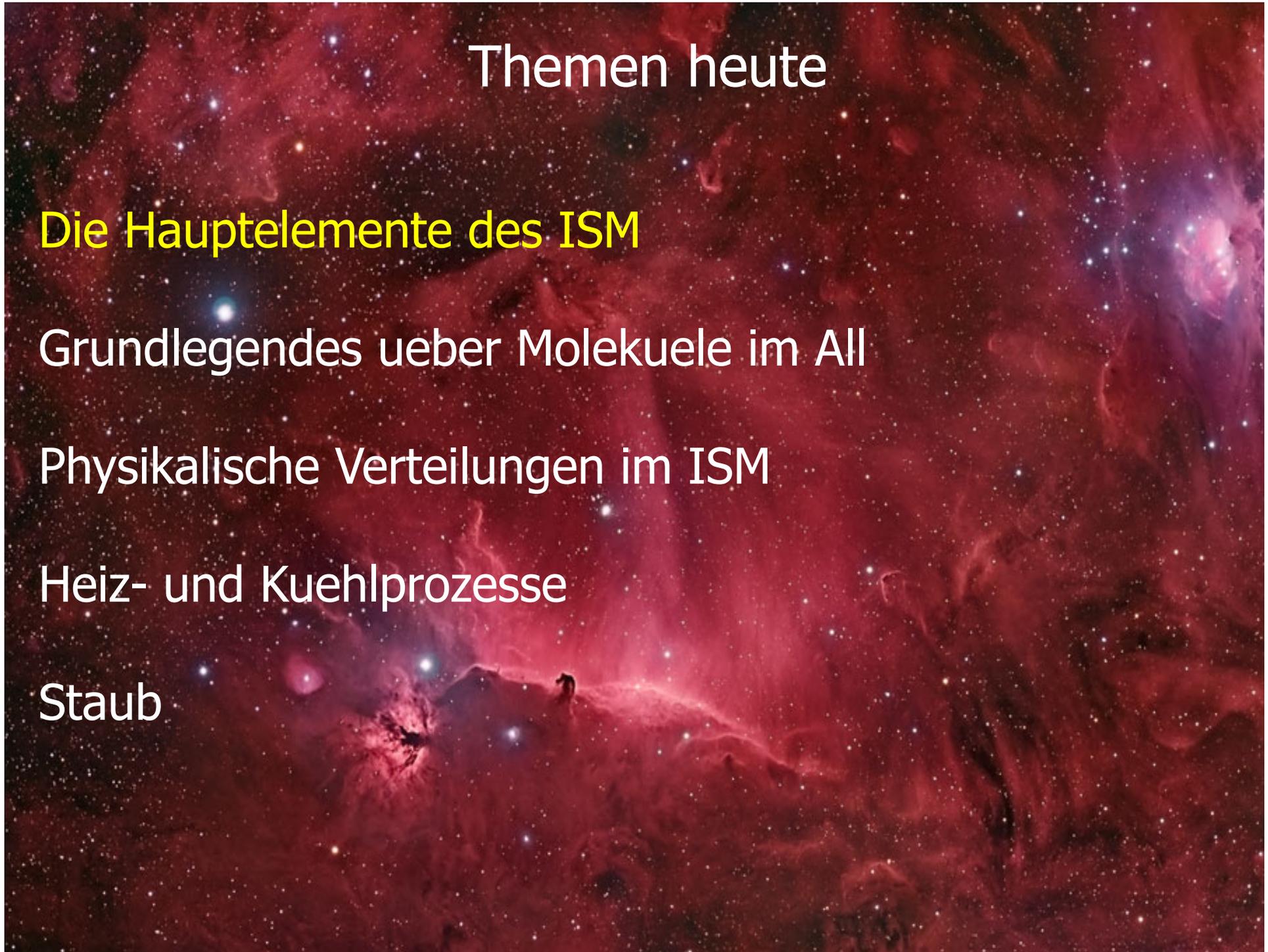
## Die Hauptelemente des ISM

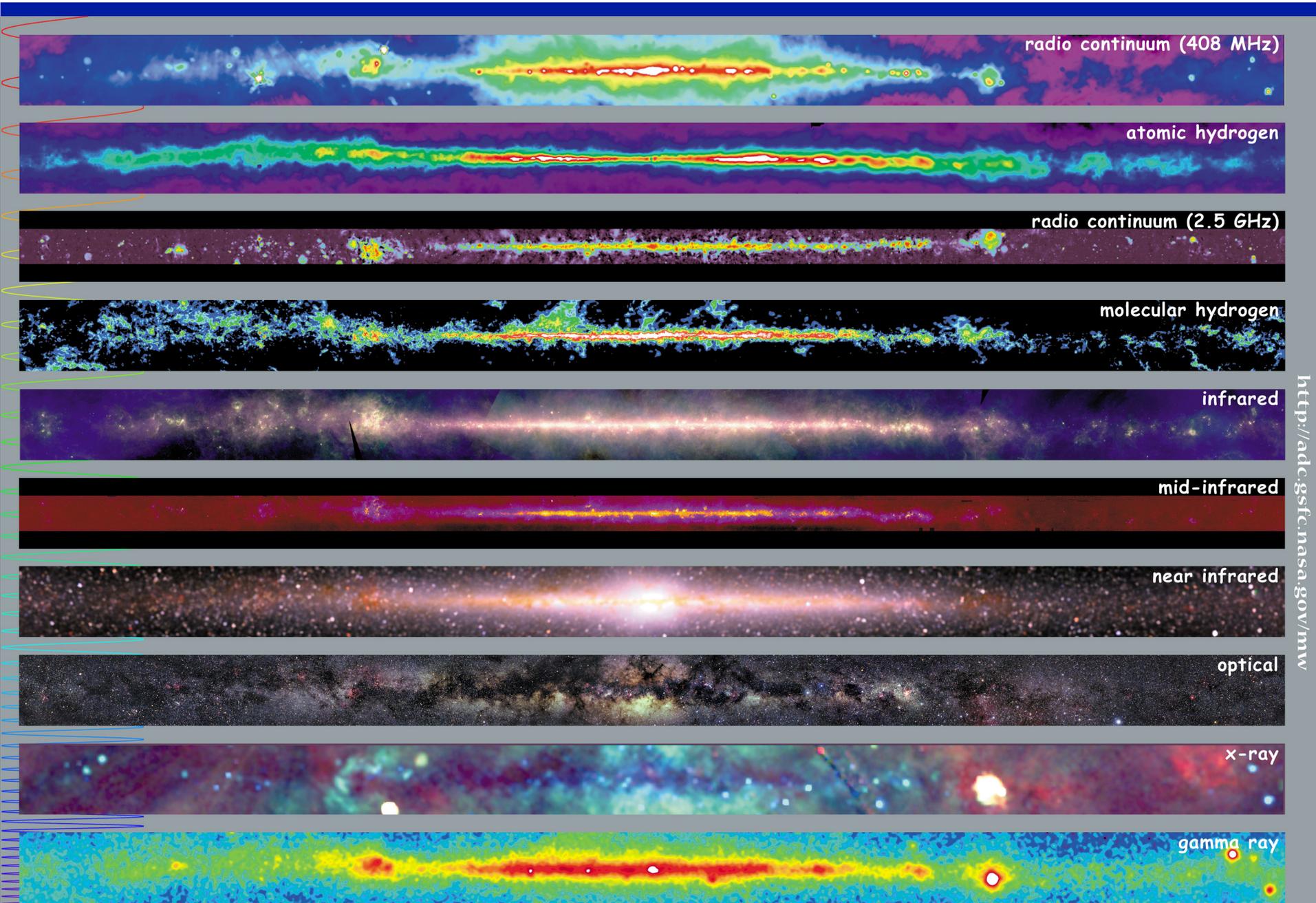
Grundlegendes ueber Molekuele im All

Physikalische Verteilungen im ISM

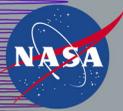
Heiz- und Kuehlprozesse

Staub





<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



# Multiwavelength Milky Way

# Historische Modelle des ISM (I)

## 1.) Einfaches 2-Phasen Model (Field et al. 1969)

Idee: Gleichgewicht: Heizrate  $\Gamma(n, T) =$  Kuehlrate  $\Lambda(n, T)$

Daraus folgt Beziehung zwischen Dichte  $n$  und Temperatur  $T$  (des Gases),  
→ also eine Zustandsgleichung

Druckgleichgewicht zwischen Phasen erlaubt unterschiedliche Kombinationen  
(ideales Gas:  $p = nkT$ ).

Allerdings sind nur gewisse Kombinationen thermisch stabil abhaengig von  
Verhalten mit Dichte von  $\Gamma(n, T)$  von  $\Lambda(n, T)$ .

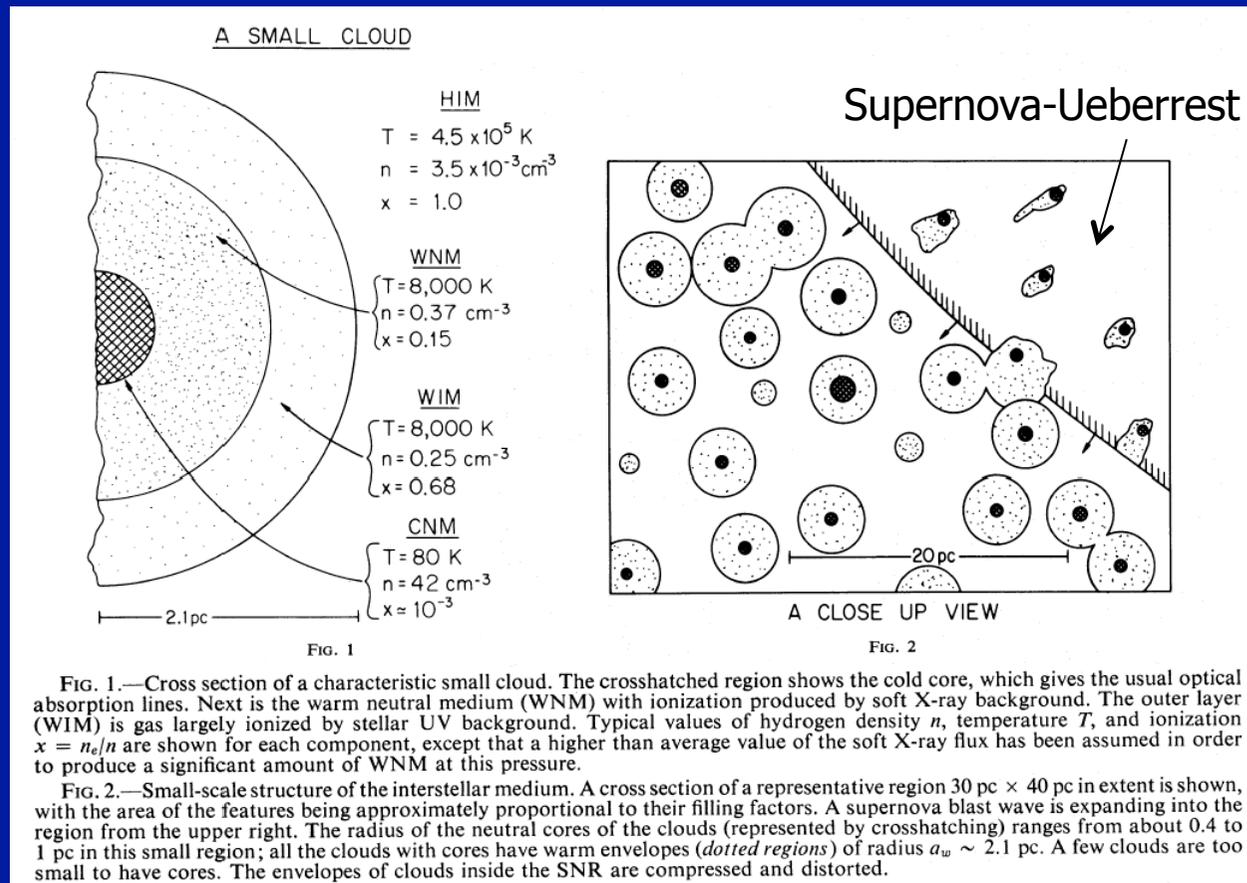
2 Phasen: a.)  $n < 0.3 \text{ cm}^{-3}$ ,  $T \approx 5000 - 10000 \text{ K}$  (thin, warm, ionised)  
b.)  $n \approx 50 \text{ cm}^{-3}$ ,  $T \approx 80 - 100 \text{ K}$  (dense, cold, neutral)

**Aber:** Kosmische Strahlung reicht nicht zum Heizen auf 80-100K. Ionisationsrate von  $10^{-15} \text{ s}^{-1}$  notwendig, aber nur  $10^{-17} \text{ s}^{-1}$  beobachtet (Copernicus UV Satellit).

# Historische Modelle des ISM (II)

## 2.) 3+ Phasen Model (McKee & Ostriker 1977)

Beinhaltet heisse Komponente und Supernova Explosionen. Dynamischer und gekoppelt an Entstehung und Ende massereicher Sterne.



# Historische Modelle des ISM (III)

## 2.) 3+ Phasen Model (McKee & Ostriker 1977)

Limitationen des Originalmodels:

- SN Raten und Leuchtkraefte ueberschaetzt.
- Kerne nicht rund sondern oftmals filamentartig.
- Beobachtungen sprechen fuer grossen Teil gleichmaessig verteiltes warmes HI Gas.

Allgemeine Kommentare:

- Model nimmt immer noch Druckgleichgewicht an zwischen Phasen.
- Eine wichtige Phase fehlt → MOLEKUELWOLKEN ( $T \sim 10\text{K}$ ,  $n > 300 \text{ cm}^{-3}$ )

Phasenuebergaeuge sind moeglich (z.B. durch Heiz- und Kuehlprozesse)

Diffuse Wolken → Molekuelwolken → Sterne

# Ueberblick ueber die Komponenten

Phase	$n$ [cm <sup>-3</sup> ]	$T$ [K]	$f$	$M$ [10 <sup>9</sup> M <sub>⊙</sub> ]
Hot ionised medium	0.003	10 <sup>6</sup>	0.5	0.1
Warm ionised medium	0.3	8000	0.1	1.0
Warm neutral medium (HI)	0.5	8000	0.4	1.4
Cold neutral medium (HI clouds)	50	80	-	2.5
Molecular clouds	>300	10	-	2.5
HII regions	1 – 10 <sup>5</sup>	10 <sup>4</sup>	-	0.05

$f$  als Volumenfuellfaktor der Galaktischen Scheibe

# Uebersicht ueber die Komponenten

Phase

Hot ionised medium

Warm ionised medium

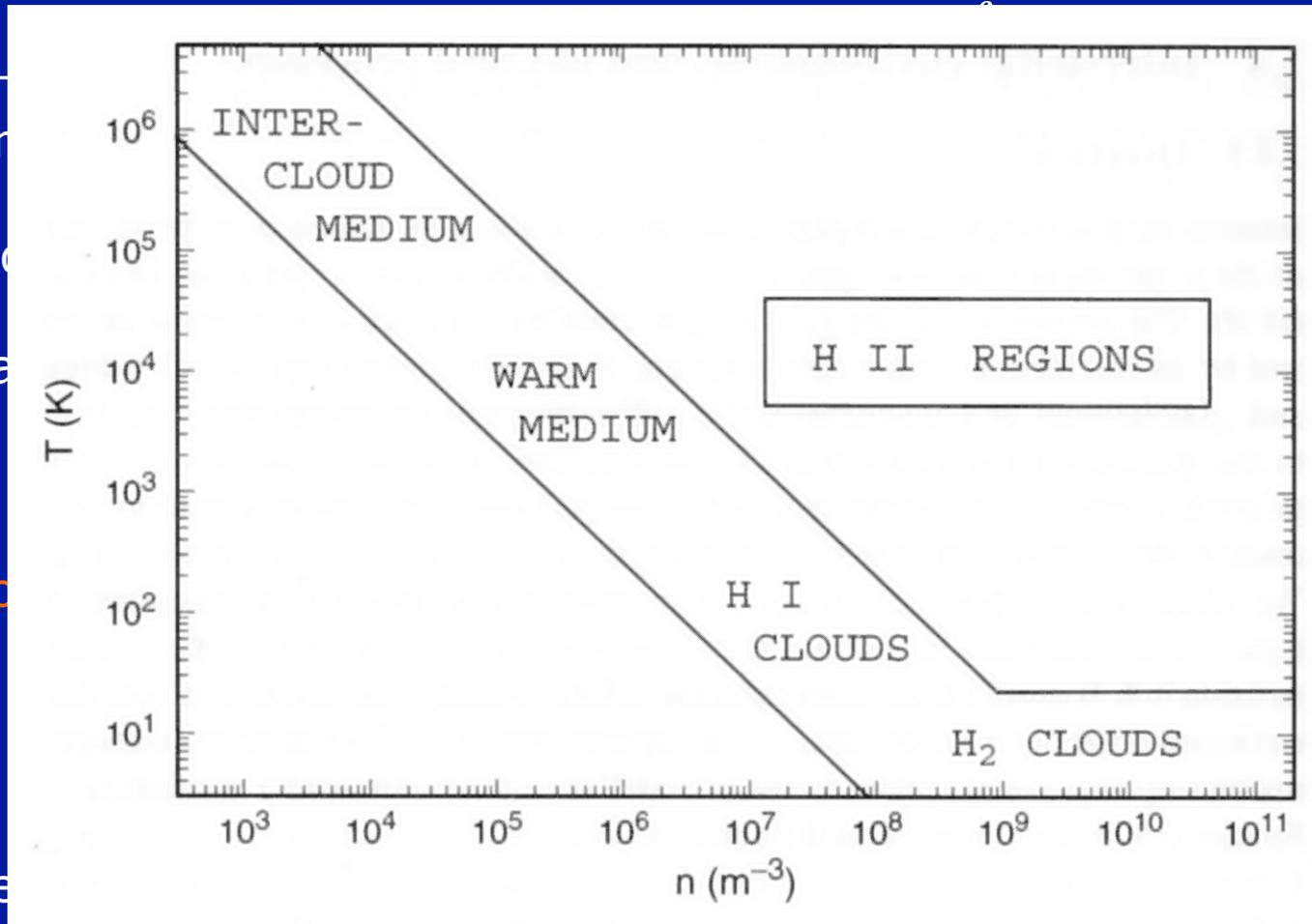
Warm neutral medium

Cold neutral medium

Molecular clouds

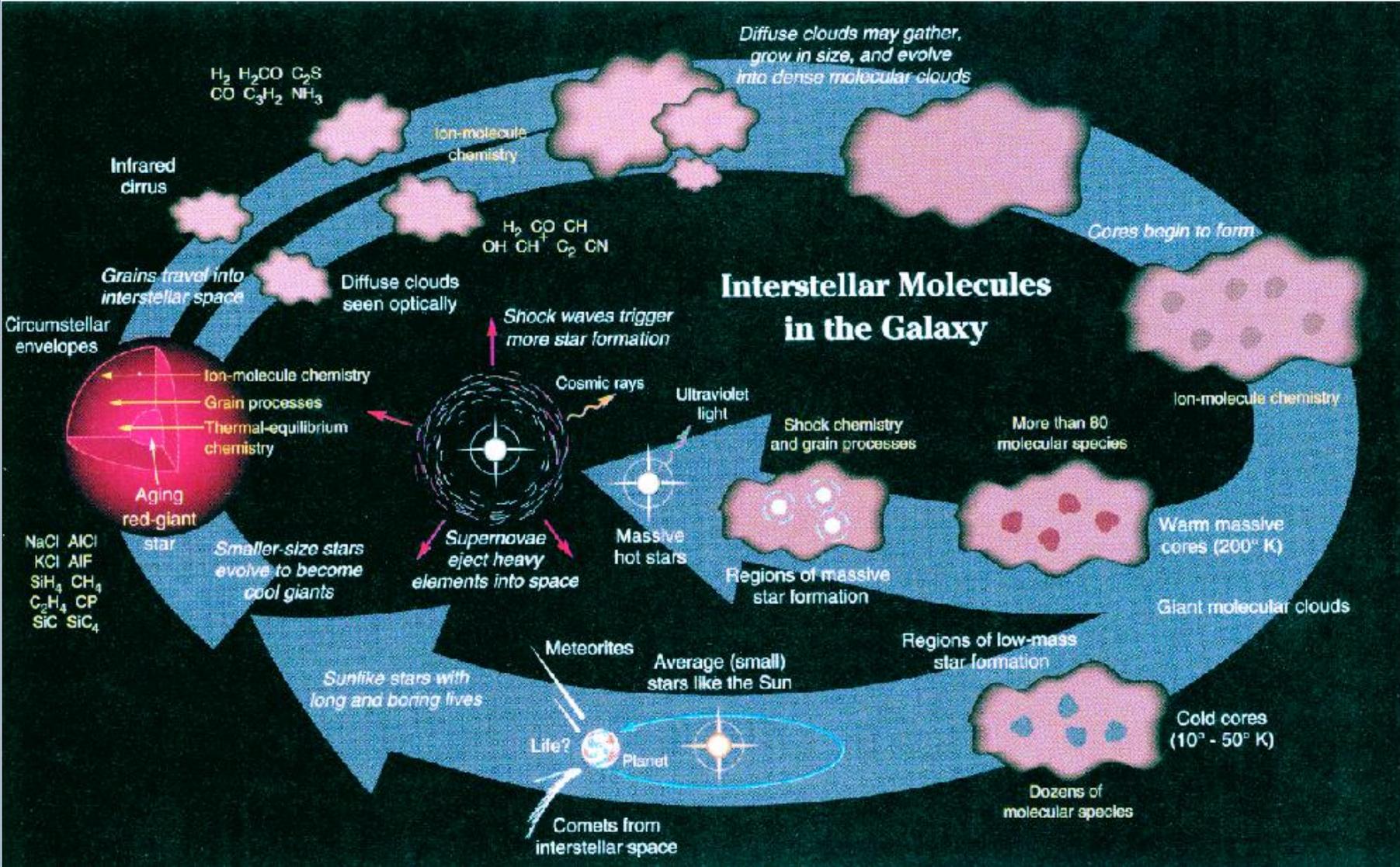
HII regions

$f$  als Volumen



$M_{\odot}$  ]

# Der kosmische Zyklus



# Themen heute

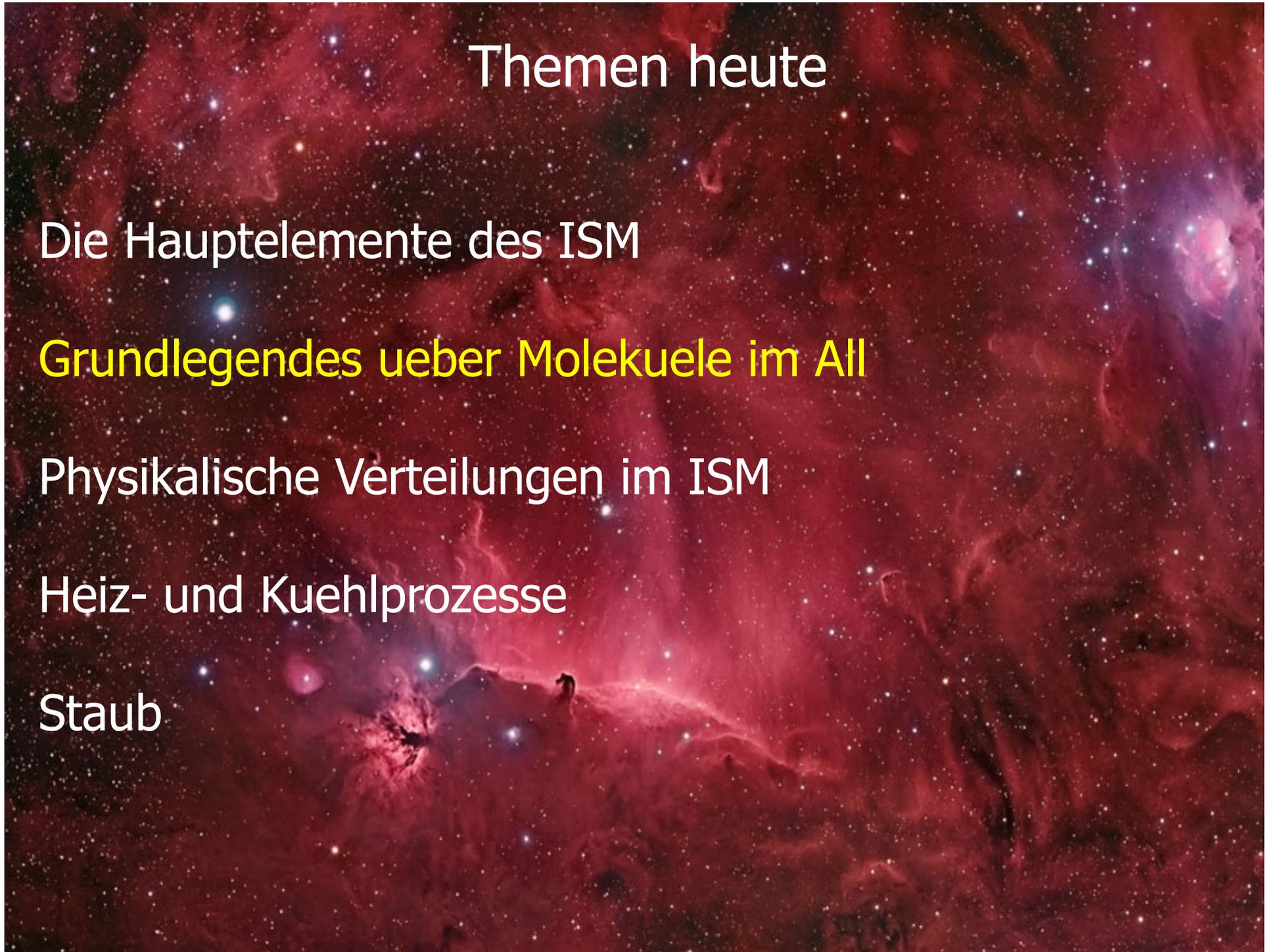
Die Hauptelemente des ISM

Grundlegendes ueber Molekuele im All

Physikalische Verteilungen im ISM

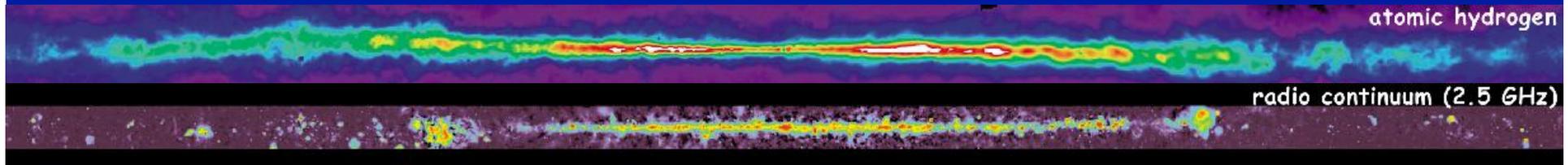
Heiz- und Kuehlprozesse

Staub

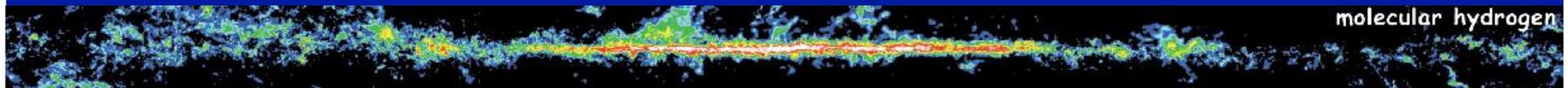


# Basics I

Neutrales und ionisiertes Medium



Sterne entstehen in dichten Kernen aus Gas und Staub



## **Die wichtigsten astrophysikalischen Untersuchungsmethoden:**

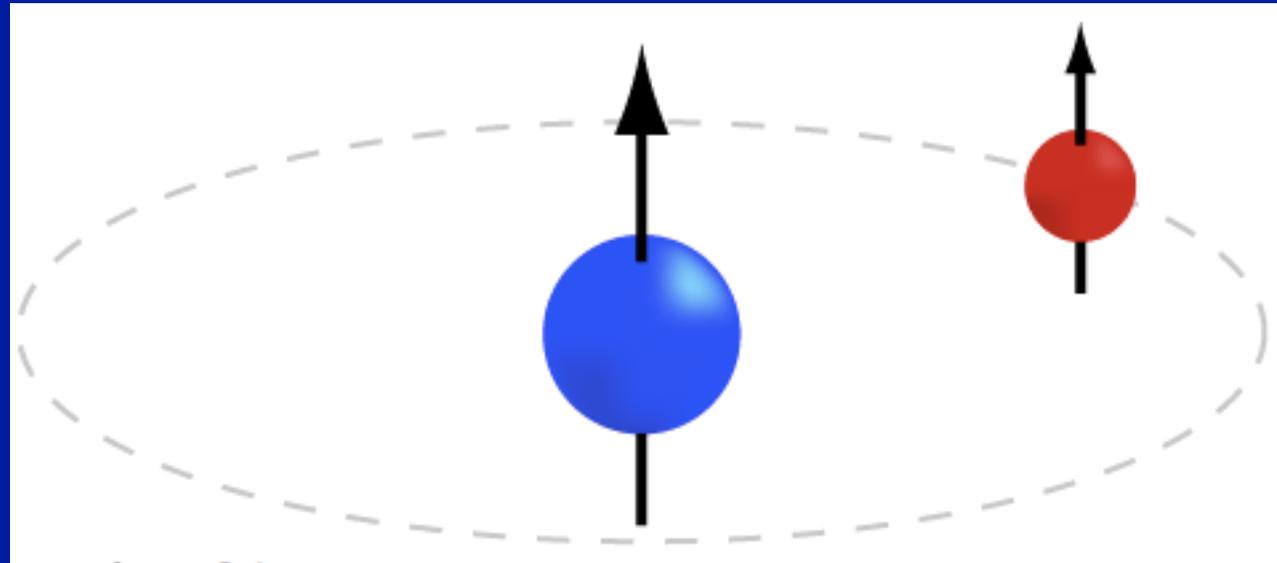
Spektrallinien der unterschiedlichen Moleküle

Absorption und Emission von thermischen Staub

# Atomarer Wasserstoff HI

$F=1 \rightarrow$  Spin parallel  
(angeregter Zustand,  
stat. Gew.  $g=3$ )

$F=0 \rightarrow$  antiparallel  
( $g=1$ )



Zwei Energielevel durch magnetische Interaktion zwischen Proton und  $e^-$  Spin.  
 $\rightarrow$  Spin flip verursacht Linienemission bei 1.4GHz oder 21cm.

Einstein A Koeffizient

$$A_{10} \approx 2.85 \times 10^{-15} \text{ s}^{-1} \text{ sehr niedrig!}$$

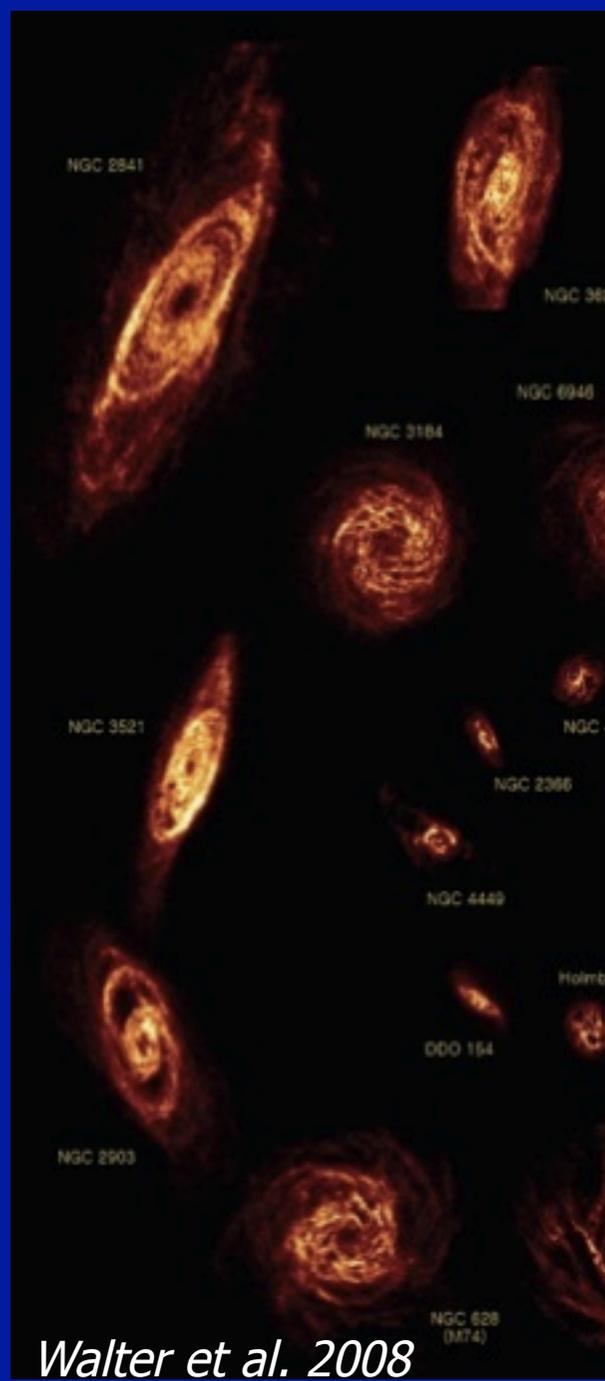
Das resultiert in einer  
Halb-Lebensdauer:

$$\tau_{1/2} = A_{10}^{-1} \approx 3.5 \times 10^{14} \text{ s} \approx 11 \text{ million years}$$

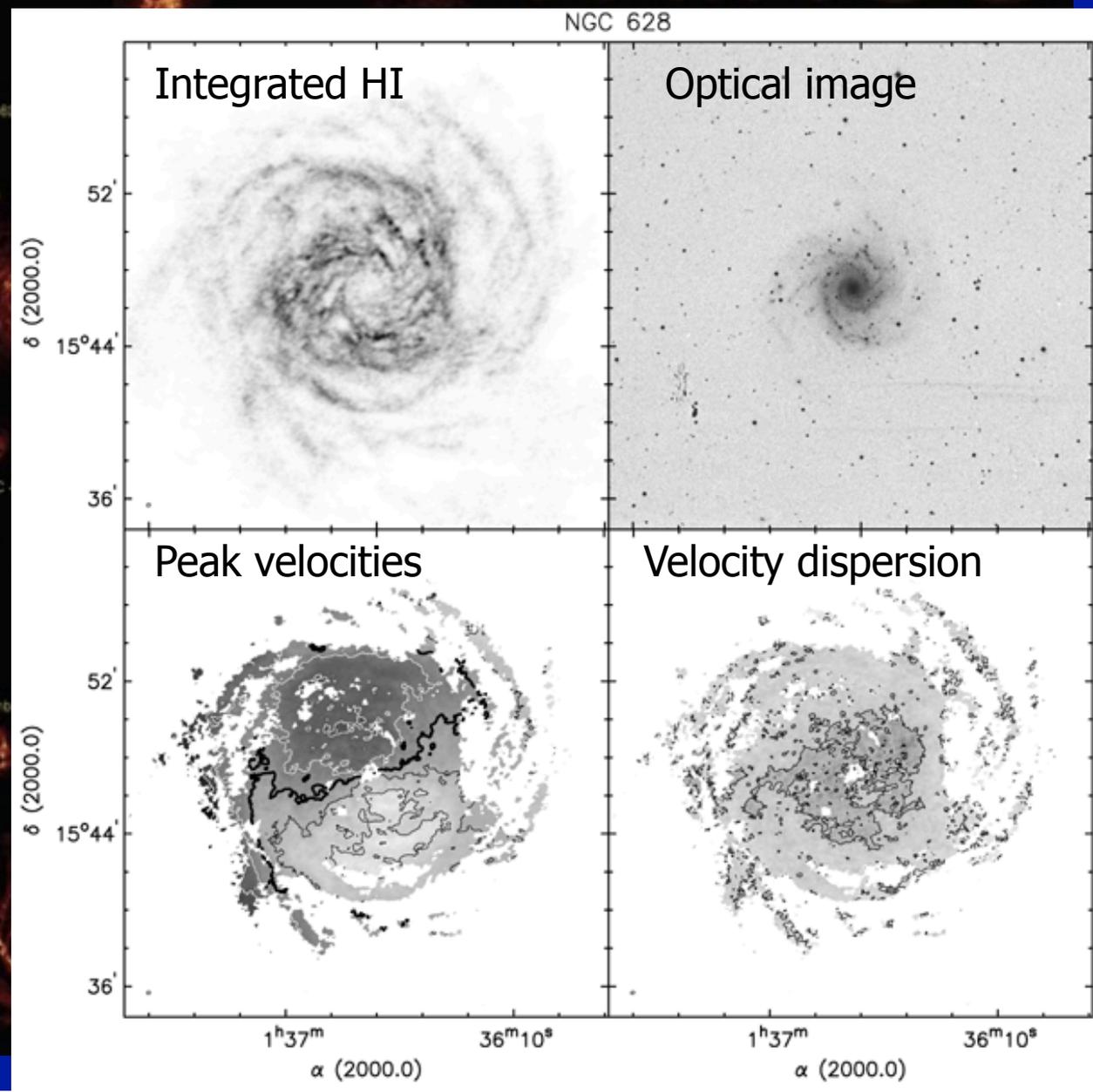
$\rightarrow$  Kritische Dichten  $\ll 1 \text{ cm}^{-3} \rightarrow$  Kollisionsanregung moeglich.

$\rightarrow$  Early detections were only possible at low densities of ISM!

# THINGS



Walter et al. 2008



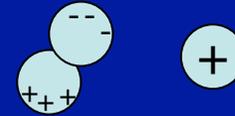
# Basics II

- Hohe Staubsaeulendichten absorbieren optische und UV Strahlung in Kernen.  
→ wichtig, dass Moelkuele ueberhaupt entstehen und ueberleben koennen.
- Geschichte:
  - 30er Jahre: CH, CH<sup>+</sup> und CN werden in diffusen Wolken ueber Absorbtions-spektren gegen Hintergrundsterne gemessen
  - 60er: OH, NH<sub>3</sub> und H<sub>2</sub>O werden bei Radiowellenlaengen entdeckt.
  - 1970: CO in Orion
- Entstehung von Moelkuelen Energieproblem. 2 Atome mit positiver Gesamt-energie naehern sich. Wuerden sich also auch wieder abstossen, falls Energie nicht anderweitig abgegeben werden koennte ... Moeglichkeiten:
  - Kollision mit drittem Atom, dass Energien aufnimmt  
→ unwahrscheinlich bei den geringen Dichten
  - Bildung des Molekuels in angeregtem Zustand, dann Abstrahlung.  
→ Ebenso geringe Wahrscheinlichkeit fuer solche Strahlungsprozesse.
- Ionen-Molekuel or Ionen-Atom Reaktionen koennen Energieproblem loesen.
- Neutral-neutral Reaktionen auf Stauboberflaechen als Katalysator wichtig.

# Basics III

Ionen induzieren Dipolmoment in Atomen oder Molekuelen, die dann eine Elektrostatische Anziehung zwischen beiden bewirkt.

→ Effektiver Wirkungsquesrschnitt wird erhoeht  
gegenueber dem geometrischen.



Schon bei geringen T koennen solche Reaktionen fuer einen grossen Anteil and interstellaren Molekuelen verantwortlich sein. Aber es sind nicht genuegend Ionen vorhanden um  $H_2$  Hauefigkeiten zu erklaren

→ Stauboberflaechenchemie wichtig!

Einfache Molekuele wie CO oder CS lassen sich mit Ionen-Molekuelchemie erklaren. Fuer komplexere Molekuele wiederum Stauboberflaechenchemie.

Keine groesseren anorganischen Spezies als  $NH_3$ . Dafuer gibt es grosse Kohlenstoffketten → Kohlenstoffverbing sehr wichtig!

CO haeufigstes Molekuel nach  $H_2$ .

→ Meiste Information ueber Molekuelwolken aus CO Beobachtungen

# Molekuele im All

2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	atoms
H2	C3	c-C3H	C5	C5H	C6H	CH3C3N	CH3C4H	CH3C5N?	HC9N	CH3OC2H5	HC11N	
AlF	C2H	l-C3H	C4H	l-H2C4	CH2CHCN	HCOOCH3	CH3CH2CN	(CH3)2CO				
AlCl	C2O	C3N	C4Si	C2H4	CH3C2H	CH3COOH?	(CH3)2O	NH2CH2COOH?				
C2	C2S	C3O	l-C3H2	CH3CN	HC5N	C7H	CH3CH2OH	CH3CH2CHO				
CH	CH2	C3S	c-C3H2	CH3NC	HCOCH3	H2C6	HC7N					
CH+	HCN	C2H2	CH2CN	CH3OH	NH2CH3	CH2OHCHO	C8H					
CN	HCO	CH2D+?	CH4	CH3SH	c-C2H4O	CH2CHCHO						
CO	HCO+	HCCN	HC3N	HC3NH+	CH2CHOH							
CO+	HCS+	HCNH+	HC2NC	HC2CHO								
CP	HOC+	HNCO	HCOOH	NH2CHO								
CsI	H2O	HNCS	H2CHN	C5N								
HCl	H2S	HOCO+	H2C2O	HC4N								
KCl	HNC	H2CO	H2NCN									
NH	HNO	H2CN	HNC3									
NO	MgCN	H2CS	SiH4									
NS	MgNC	H3O+	H2COH+									
NaCl	N2H+	NH3										
OH	N2O	SiC3										
PN	NaCN	C4										
SO	OCS											
SO+	SO2											
SiN	c-SiC2											
SiO	CO2											
SiS	NH2											
CS	H3+											
HF	SiCN											
SH	AlNC											
FeO(?)	SiNC											

Um die 180 detektierten interstellare Molekuele (Nov. 2013) ([www.cdms.de](http://www.cdms.de)). 55 (+2 tentative) Molekueledetektionen in extragalaktischen Systemen.

Interessante Webseiten:

<http://physics.nist.gov/cgi-bin/micro/table5/start.pl> → Im ISM beobachtet

<http://www.cdms.de> → Labordaten

# Ein paar besonders wichtige Molekuele

Mol.	Trans.	Abund.	Crit. Dens. [cm <sup>-3</sup> ]	Comments
H <sub>2</sub>	1-0 S(1)	1	8x10 <sup>7</sup>	Shock tracer
CO	J=1-0	8x10 <sup>-5</sup>	3x10 <sup>3</sup>	Low-density probe
OH	<sup>2</sup> Π <sub>3/2</sub> ; J=3/2	3x10 <sup>-7</sup>	1x10 <sup>0</sup>	Magnetic field probe (Zeeman)
NH <sub>3</sub>	J,K=1,1	2x10 <sup>-8</sup>	2x10 <sup>4</sup>	Temperature probe
CS	J=2-1	1x10 <sup>-8</sup>	4x10 <sup>5</sup>	High-density probe
SiO	J=2-1		6x10 <sup>5</sup>	Outflow shock tracer
H <sub>2</sub> O	6 <sub>16</sub> -5 <sub>23</sub>		1x10 <sup>3</sup>	Maser
H <sub>2</sub> O	1 <sub>10</sub> -1 <sub>11</sub>	<7x10 <sup>-8</sup>	2x10 <sup>7</sup>	Warm gas probe
CH <sub>3</sub> OH	7-6	1x10 <sup>-7</sup>	1x10 <sup>5</sup>	Dense gas/temperature probe
CH <sub>3</sub> CN	19-18	2x10 <sup>-8</sup>	2x10 <sup>7</sup>	Temperature probe in Hot Cores

Kritische Dichte  $n_{\text{crit}} = A/\gamma$ : Dichte bei der Gas im thermischen Gleichgewicht (mit A=Einstein Koeffizient und  $\gamma$ =Kollisionsrate)

*Viele Molekuelinformationen auf: <http://www.strw.leidenuniv.nl/~moldata/> (Leiden Atomic and Molecular Database, LAMBDA)*

# Molekularer Wasserstoff (H<sub>2</sub>)

- H<sub>2</sub> besteht aus 2 identischen Atomen → kein Dipolmoment und rotationsangeregtes H<sub>2</sub> muss ueber energetisch hoehere Quadrupoluebergaenge mit T > 500K strahlen  
→ kalte Wolken muessen anderweitig beobachtet werden → z.B. CO

- H<sub>2</sub> kann in heissem Gas detektiert werden.  
Rotationsenergie:

Klassische Mechanik:  $E_{\text{rot}} = J^2/2I$

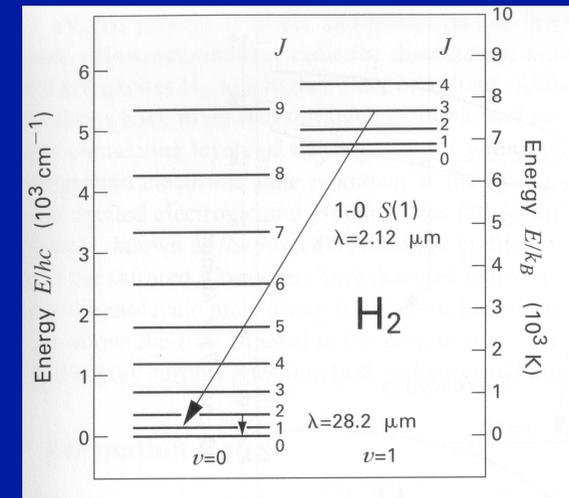
(J: Drehimpuls; I: Traegheitsmoment)

Quantenmechanik:  $E_{\text{rot}} = h^2/2I \times J(J+1)$   
(=  $BhI \times J(J+1)$ )

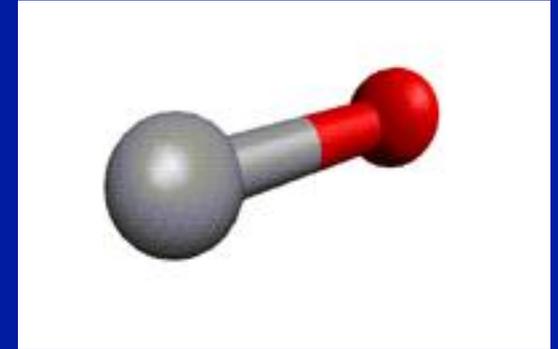
(J: Rotationsquantenzahl; B: Rotationskonstante)

- Kleines Traegheitsmoment → Grosser Abstand der Energielevel  
Erlaubte Uebergaenge  $\Delta J = 2$

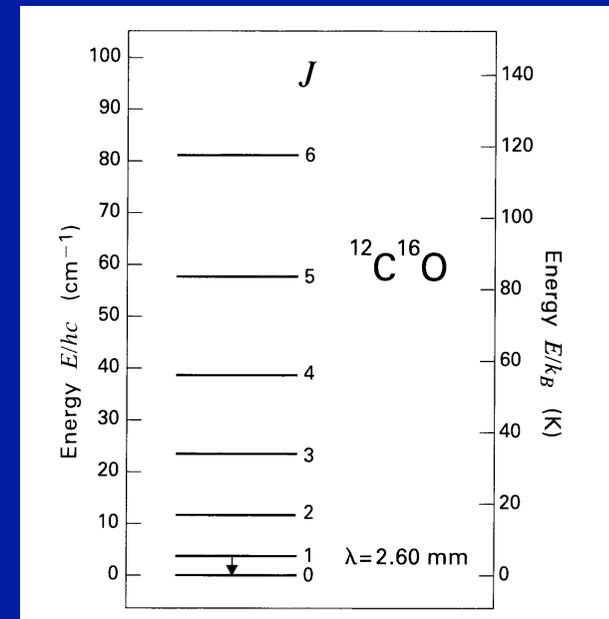
→ niedrigster Rotationsuebergang J=2-0 hat Energiedifferenz 510 K



# Kohlenmonoxid (CO)



- Entsteht ueber Gasphasenreaktionen.
- Starke Bindungsenergie (11.1 eV) verhindert schnelle Zerstoerung (self-shielding).
- Permanentes Dipolmoment → starke Emission bei (sub)mm Wellenlaengen.
- Groesseres Traegheitsmoment als H<sub>2</sub>.
  - engere Rotationsleiter,
  - J=1 Level bei  $4.8 \times 10^{-4}$  eV oder 5.5K
- In Molekuelwolken Anregung hauptsaechlich ueber Stoesse mit H<sub>2</sub>.
- Kritische Dichte fuer thermodynamisches Gleichgewicht mit H<sub>2</sub>  $n_{\text{crit}} = A/\gamma \sim 3 \times 10^3 \text{cm}^{-3}$ .  
(A: Einstein A coefficient;  $\gamma$ : Kollisionsrate mit H<sub>2</sub>)
- Levelverteilung folgt Boltzmann:  
$$n_{J+1}/n_J = g_{J+1}/g_J \exp(-\Delta E/k_B T_{\text{ex}})$$
  
(fuer CO, statistische Gewichte  $g_J = 2J + 1$ )  
Die Anregungstemperatur  $T_{\text{ex}}$  is ein Mass fuer die Levelverteilung und entspricht der kinetischen Temperatur bei Dichten  $> n_{\text{crit}}$ .



# Anwendung: Galaktische Gasstruktur

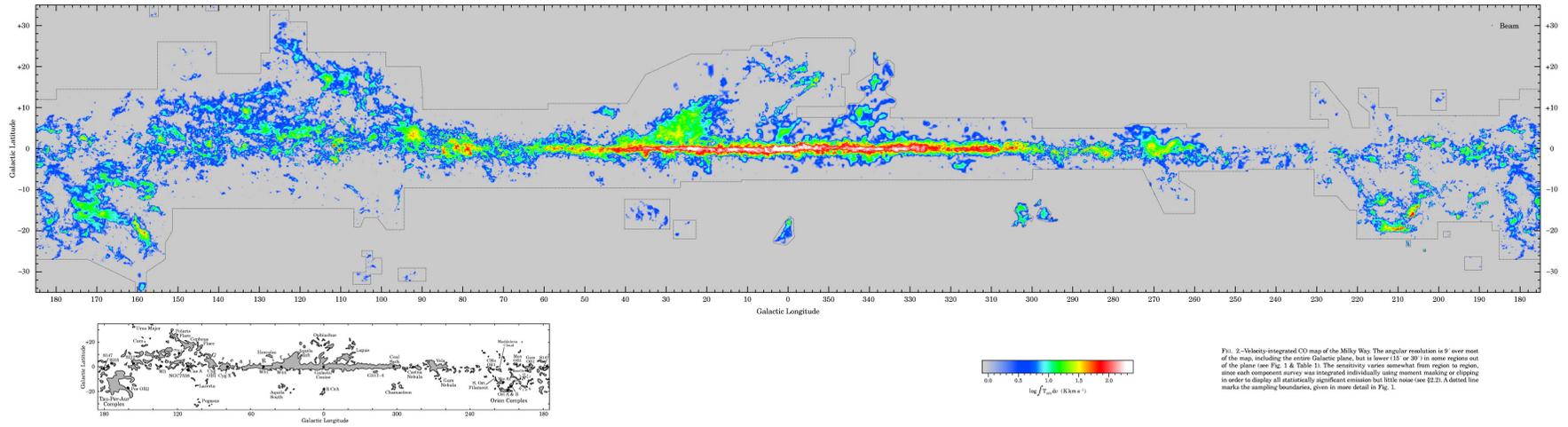


FIG. 2.—Velocity-integrated CO map of the Milky Way. The angular resolution is  $\theta'$  over most of the map, including the entire Galactic plane, but is lower ( $13'$  or  $20'$ ) in some regions out of the plane (see FIG. 1 & Table 1). The sensitivity varies somewhat from region to region, since each component survey was integrated individually using moment stacking or clipping in order to display all statistically significant emission but little noise (see §2.2). A dotted line marks the sampling boundaries, given in more detail in FIG. 1.

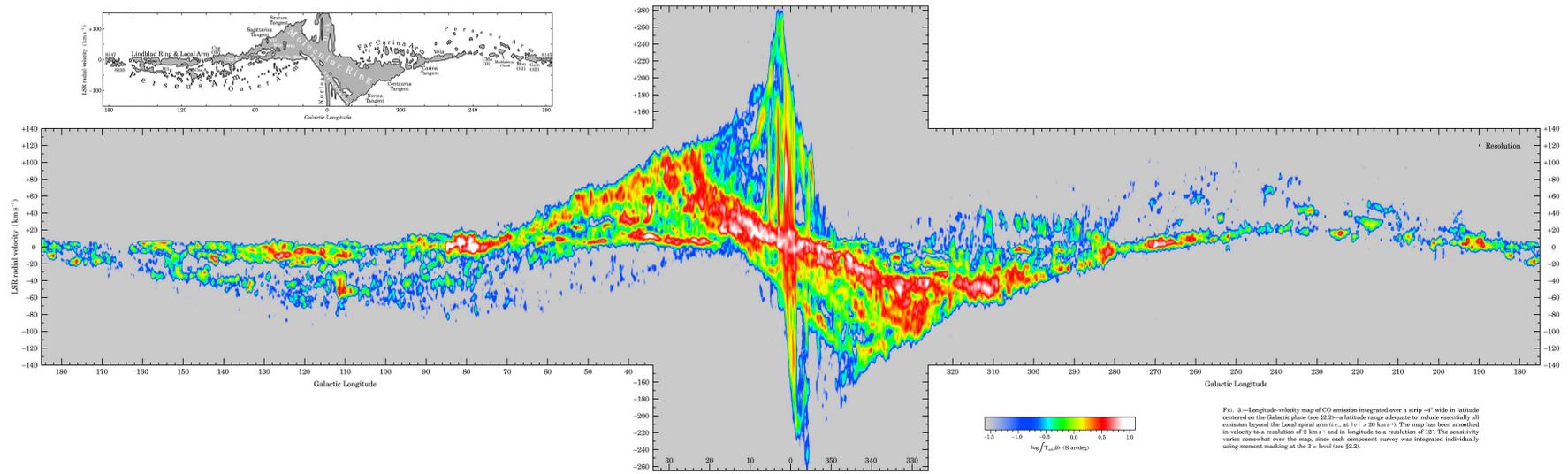
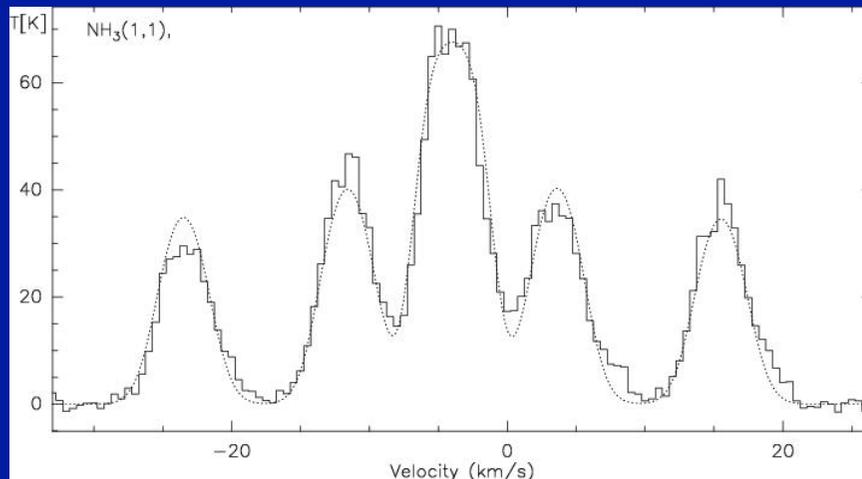
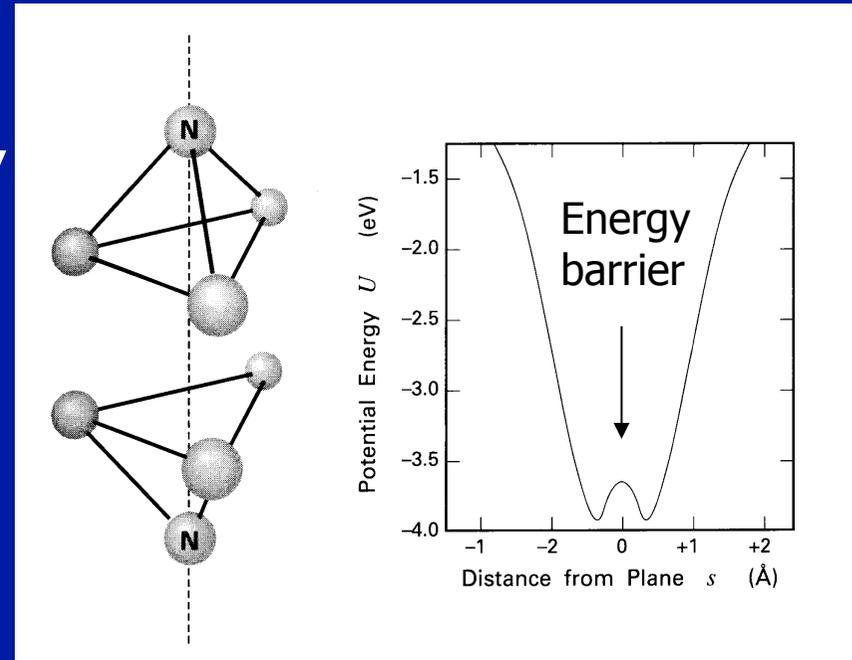
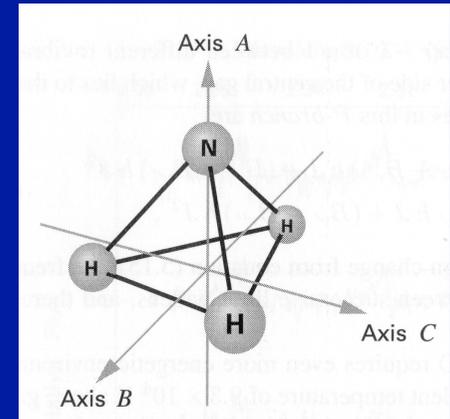


FIG. 3.—Longitude-velocity map of CO emission integrated over a strip  $2^\circ$  wide in latitude centered on the Galactic plane (see §2.2)—a latitude range adequate to include essentially all emission beyond the Local spiral arm (i.e., at  $l > 20^\circ$ ). The map has been smoothed in velocity to a resolution of  $2 \text{ km s}^{-1}$  and in longitude to a resolution of  $12'$ . The sensitivity varies somewhat over the map, since each component survey was integrated individually using moment stacking at the  $3-\sigma$  level (see §2.2).

# Ammoniak (NH<sub>3</sub>)

- Entsteht auch durch Gasphasenreaktionen.
- Symmetric-top molecule.
- $E_{\text{rot}} = J_A^2/2I_A + J_B^2/2I_B + J_C^2/2I_C$   
→ nützliche Uebergaenge nur bei hohen Frequenzen
- Beste Uebergaenge allerdings bei 24GHz  
→ Tunneln der Energiebarriere
- Weitere Effekte wie nicht-sphaerische Ladungsverteilung, Quadrupolmoment, magnetische Effekte zwischen Spins, verursachen weitere Hyperfeinaufspaltung



# Themen heute

Die Hauptelemente des ISM

Grundlegendes ueber Molekuele im All

Physikalische Verteilungen im ISM

Heiz- und Kuehlprozesse

Staub

# Physikalische Bedingungen : Micro-Level

Ein Medium in hydrostatischen Gleichgewicht kann mit 4 Verteilungen beschrieben werden:

1.) MAXWELL Verteilung der Teilchengeschwindigkeiten (kinetische Energie)

$$N(v;T) = 4\pi \left( \frac{m}{2kT} \right)^{3/2} v^2 \exp\left( -\frac{mv^2}{2kT} \right) \quad v : \text{Teilchengeschwindigkeit}$$

2.) BOLTZMANN Verteilung der Energielevelbesetzungszahlen:

$$\frac{N_o}{N_u} = \frac{g_o}{g_u} \exp\left( -\frac{E_o - E_u}{kT} \right) \quad \begin{array}{l} E_{o/u} \longrightarrow \text{Energien der oberen (o) und unteren (u) Level.} \\ g_{o/u} \longrightarrow \text{Entsprechende statistische Gewichte} \end{array}$$

3.) PLANCK Strahlung (Verteilung der Photonenenergien):

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3 / c^2}{\exp(h\nu / kT) - 1} \quad \nu : \text{Photonenfrequenz}$$

4.) SAHA Gleichung (Verteilung der Ionisationslevel im Plasma):

$$\frac{N_{j+1} N_e}{N_j} = \frac{2 U_{j+1}(T)}{U_j(T)} \left( \frac{2\pi m_e kT}{h^2} \right)^{3/2} \exp(-\chi_{j,j+1} / kT)$$

$N_{j+1}, N_j$  - Anzahldichte der (j+1)-fach und j-fach ionisierten Teilchen

$N_e$  - Elektronendichte

$\chi_{j,j+1}$  - Ionisationsenergie um vom Level  $j$  nach  $j+1$  zu gelangen

$U_{j+1}, U_j$  - Zustandfunktionen beider Zustände

# Physikalische Bedingungen : Micro-Level

Wie sehr sind diese Verteilungen im ISM gueltig?

Generell: Zeitskalen, die zu Gleichgewicht fuehren, sind vergleichbar kurz im Gegensatz zu denen die Gleichgewicht zerstueren.

1. Beispiel : Stoesse zwischen H-Atomen bei  $T = 100$  K und einem mittleren  $v \sim 1$  km/s

Wirkungsquerschnitt  $\sigma = \pi R_H^2 \sim \pi (0.1 \text{ nm})^2$

Mittlere Zeit zwischen Stoessen  $\tau_s = (v \sigma n_H)^{-1}$

Bei HI Dichte von  $1 \text{ cm}^{-3}$  folgt  $\tau_s \sim 1000$  yrs  $\rightarrow$  vergleichbar kurz zu anderen interstellaren Prozessen (ausser Shocks)

$\rightarrow$  Maxwell-Verteilung gueltig, Einfuehrung einer kinetischen Temperatur sinnvoll.

2. Beispiel : Gleichgewicht der Energielevelverteilung im ISM:

Korrekturfaktor fuer Boltzmann: 
$$\frac{1}{1 + (A_{21} / (n \gamma))}$$

Reine Boltzmannverteilung nur wenn  $(n \gamma) \gg A_{21}$

$A_{21} [\text{s}^{-1}]$  Einstein coefficient for spontaneous radiative decay  
 $\gamma [\text{cm}^3 \text{ s}^{-1}]$  collision rate  
 $n [\text{cm}^{-3}]$  number density

Im wenig dichten ISM sind Kollisionsraten gering (see 1.). Fuer erlaubte Uebergaenge ( $A_{21} \sim 10^8 \text{ s}^{-1}$ ) werden die Korrekturfaktoren gross  $\rightarrow$  fast alle Teilchen im Grundzustand. Fuer verbotenen Uebrgaenge ( $A_{21} \sim 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) naehern sich Verteilungen Boltzmann.

Fuer dichte Kerne: Z.B. CO(1-0)  $\rightarrow$  Uebungsaufgabe

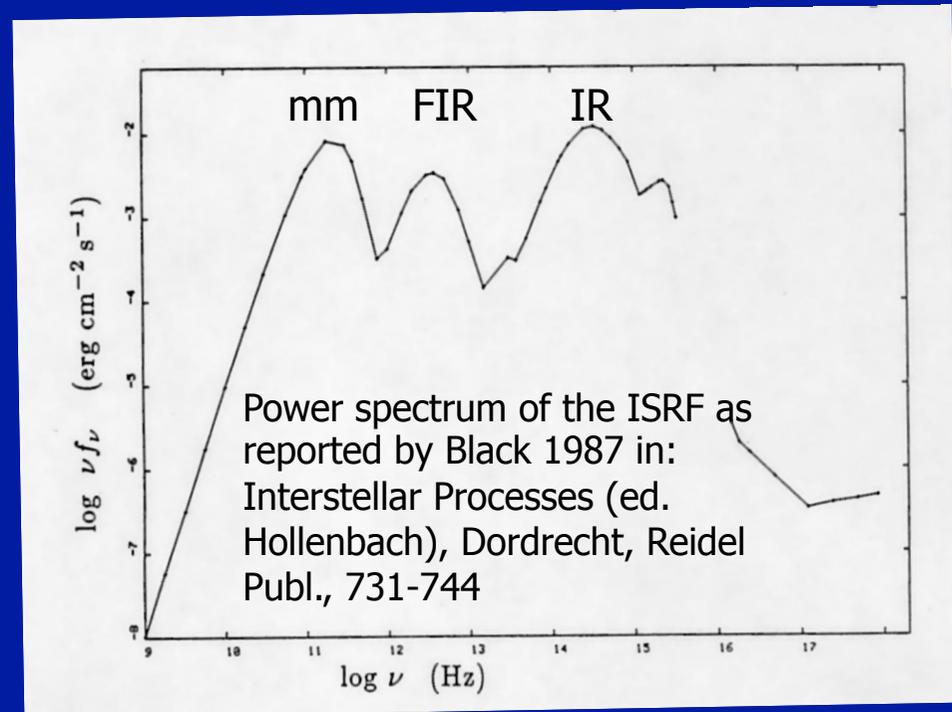
# Physikalische Bedingungen : Micro-Level

Wie sehr sind diese Verteilungen im ISM gueltig?

3. Beispiel : Interstellares Strahlungsfeld (ISRF) : Summe aller Beitrage der Emittierenden Objekte (Sterne, Staub, Gas) in der Umgebung der Gaswolke

ISRF kann nicht mit Planck genaehert werden  $\rightarrow$  ISRF nicht im theromodynamischen Gleichgewicht.

Aber wiederum koennen dichte Kerne recht gut mit einfachen oder auch multiplen Planck-Funktionen genaehert werden.



# Themen heute

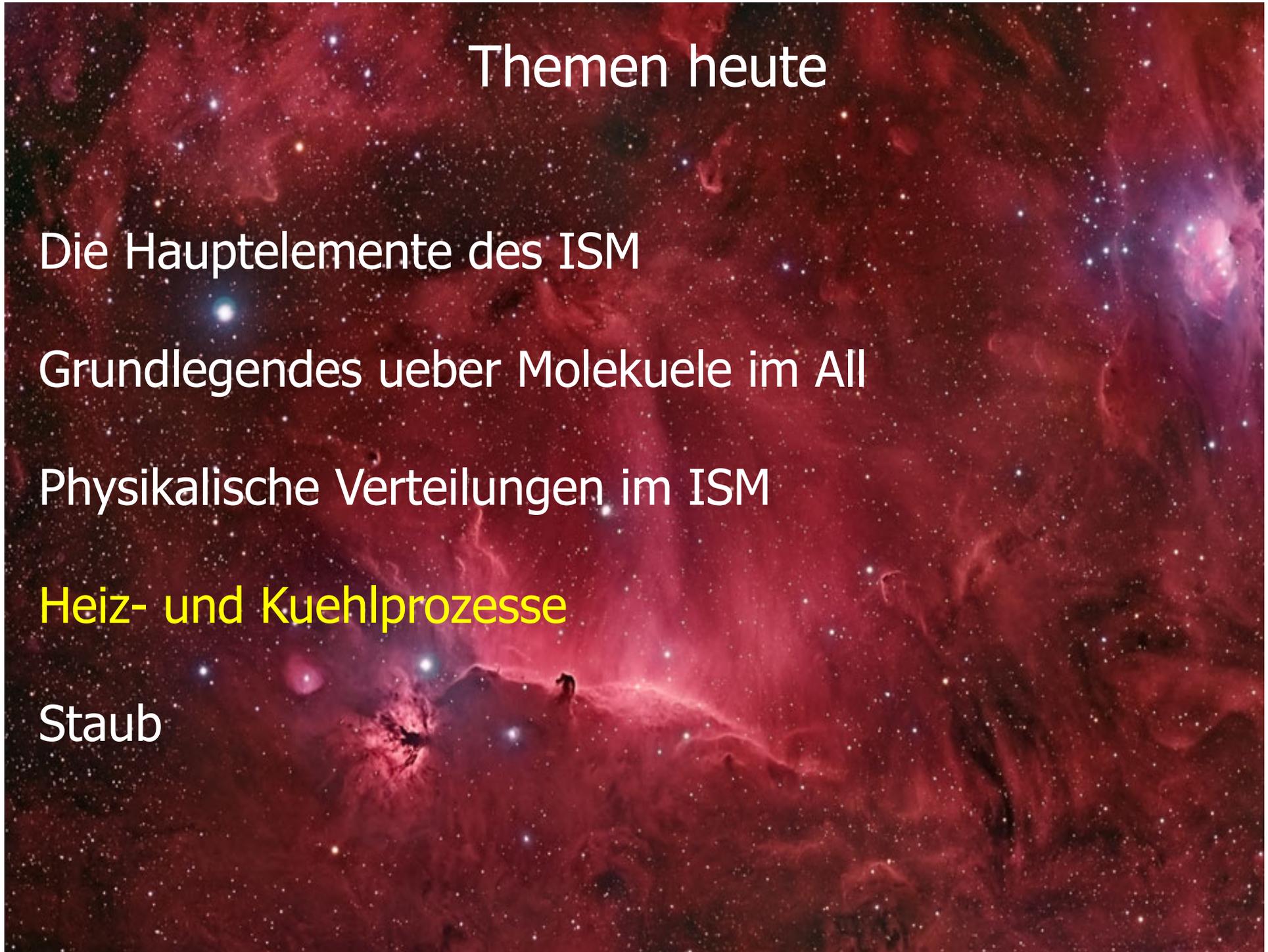
Die Hauptelemente des ISM

Grundlegendes ueber Molekuele im All

Physikalische Verteilungen im ISM

Heiz- und Kuehlprozesse

Staub



# Heizprozesse

UV Strahlung der Sterne

Energie der Supernovae

Energie von Ausstroemungen und Jets

Kosmische Strahlung reagiert mit HI and H<sub>2</sub>

(besteht hauptsaechlich aus relativistischen Protonen, die in magnetisierten Shocks bei Supernova < -- > Molekuelwolken Stoessen entstehen.)

$p^+ + H_2 \rightarrow H_2^+ + e^- + p^+$  (Dissoziation: Ionen auch fuer Ionen-Molekuelchemie wichtig)

Interstellare Strahlung (Diffuses Feld im interstellaren Raum)

Dissoziiert hauptsaechlich Kohlenstoff (geringeres Ionisationspotential als H<sub>2</sub>)

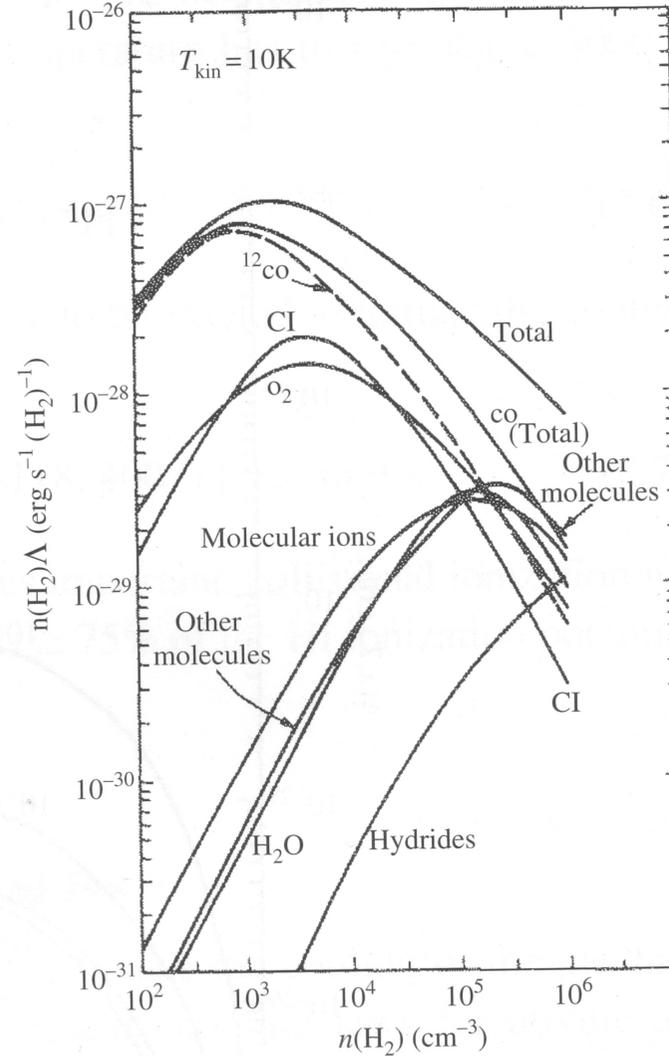
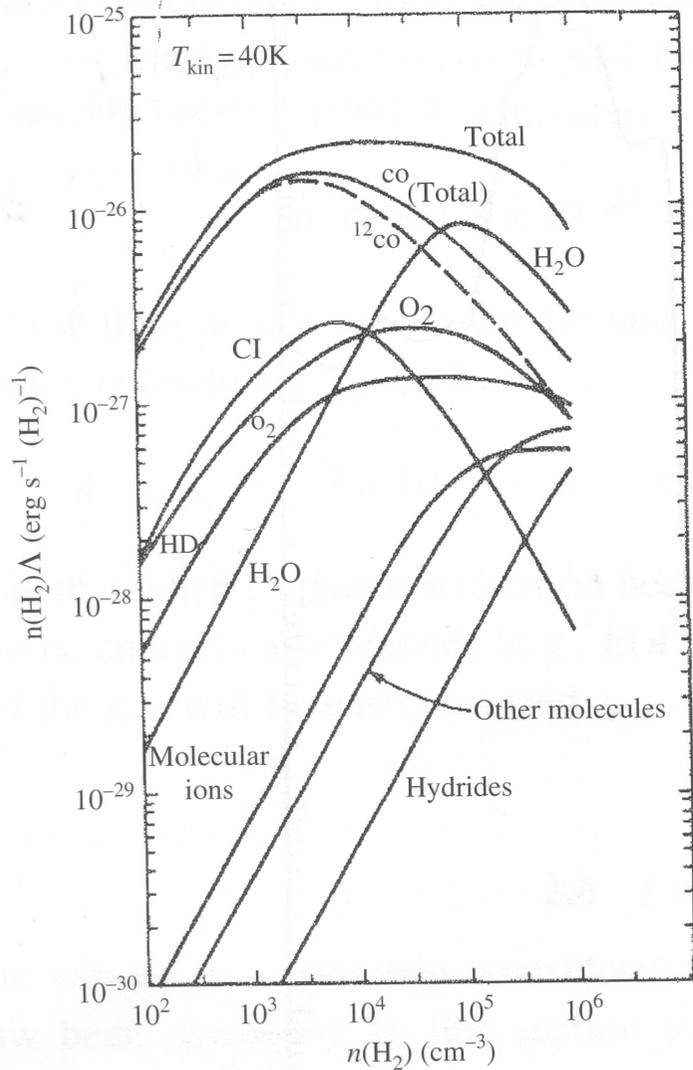
$C + h\nu \rightarrow C^+ + e^-$  Elektron verteilt Energie dann an Umgebungsatome durch Stoesse

Photoelectrische Heizung: - Heitzt Staub, der Strahlung wieder im IR abgibt.

- UV Photonen schlagen e<sup>-</sup> aus Staub, und diese e<sup>-</sup> wiederum heizen Gas ueber Stoesse.

# Kuehlprozesse

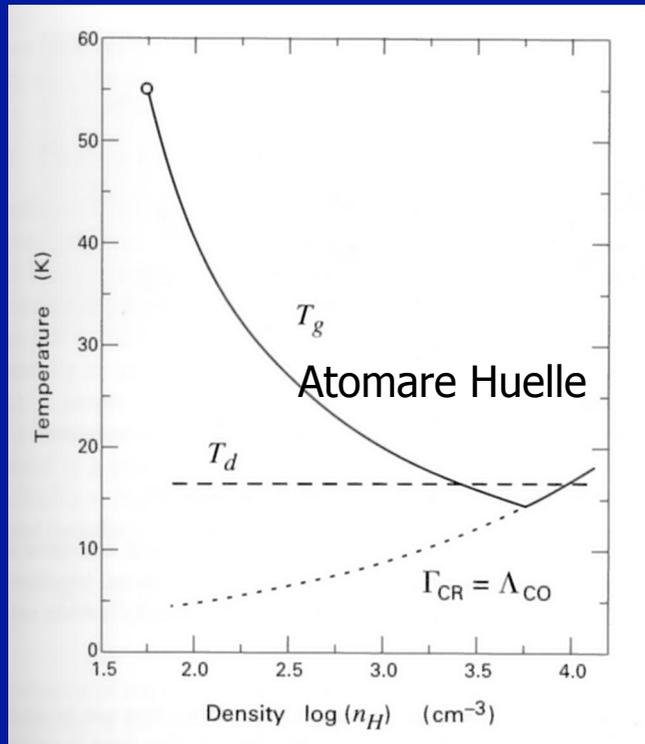
- Hauptkuehlprozesse sind effizient
- Wasser und Kohlenstoffdioxid



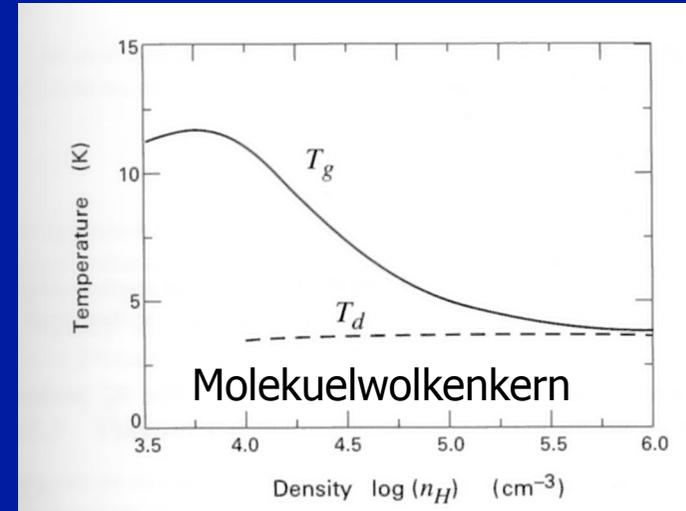
- Bei hohen Dichten koennen die niedrigsten Kuehlraten koennend
- Kollisionen koennen ausloesend Strahlung abgeben, nicht gleich.

n.  
m)  
O.  
aenge  
wolken.  
che  
von  
eise

# Staub- und Gaskuehlung und Kopplung



Heizung durch kosmische Strahlung sensistiver mit Dichte als CO-Kuehlung. →  $T_g$  steigt wieder.



$\Gamma$  – Heizrate

$\Lambda$  – Kuehlrate

- Bei geringen Dichten entkoppeln Staub und Gas. Bei hohen Dichten Kopplung.
- In dichten Kernen (keine UV-Strahlung) Gas-Heizung meist durch CRs. Staub-Heizung bei hohen Dichten hauptsaechlich Gas-Staub-Stoesse.
- Bei geringeren Dichten Gas-Kuehlung via CO, bei hohen Dichten CO & Staub.
- Bei sehr hohen Dichten naehern sich Gas- und Staubtemperaturen an (CO-Kuehlung dann unwichtig)!

# Themen heute

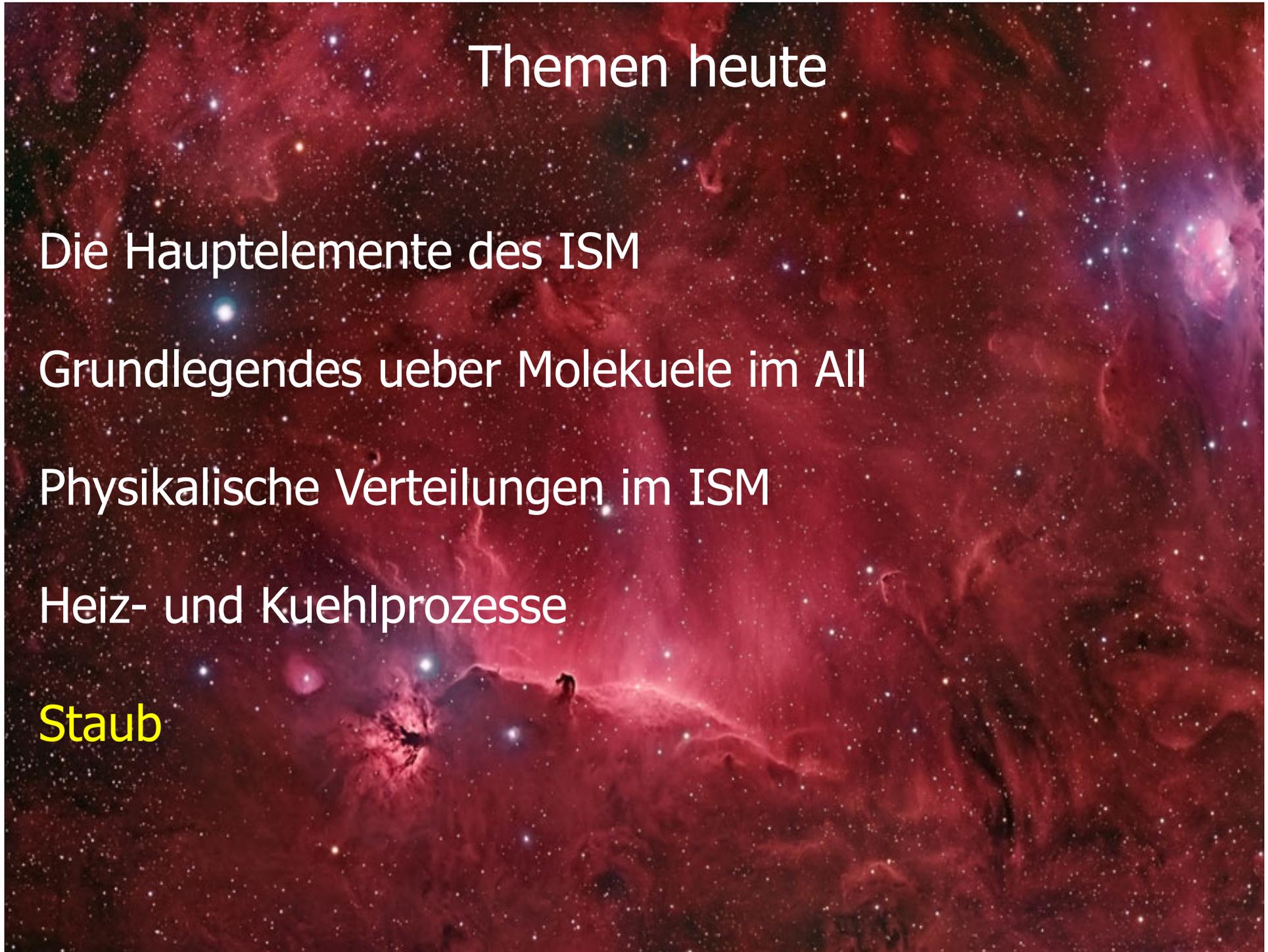
Die Hauptelemente des ISM

Grundlegendes ueber Molekuele im All

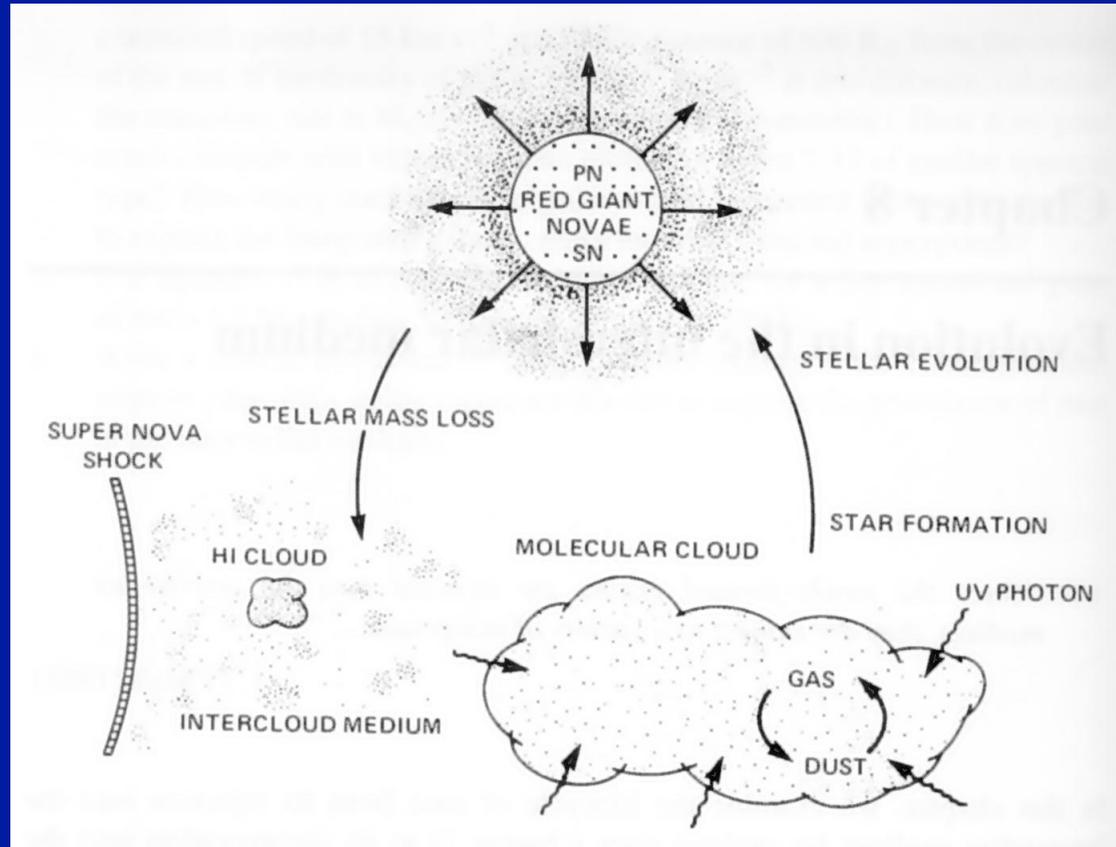
Physikalische Verteilungen im ISM

Heiz- und Kuehlprozesse

**Staub**



# Staub im Materiekreislauf



Staub wird groesstenteils in den Endstadien der Sterne produziert: Huellen von roten Riesen, planetare Nebel, Supernovae.  
Staub kann aber auch direkt im ISM entstehen

## Dust composition:

Graphite	C
Silicon carbide	SiC
Enstatite	(Fe,Mg)SiO <sub>3</sub>
Olivine	(Fe,Mg) <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Iron	Fe
Magnetite	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>

## Size distribution:

Between 0.005 and 1 $\mu$ m  
 $n(a) \sim a^{-3.5}$  (a: size)  
(Mathis, Rumpl, Nordsieck 1977)

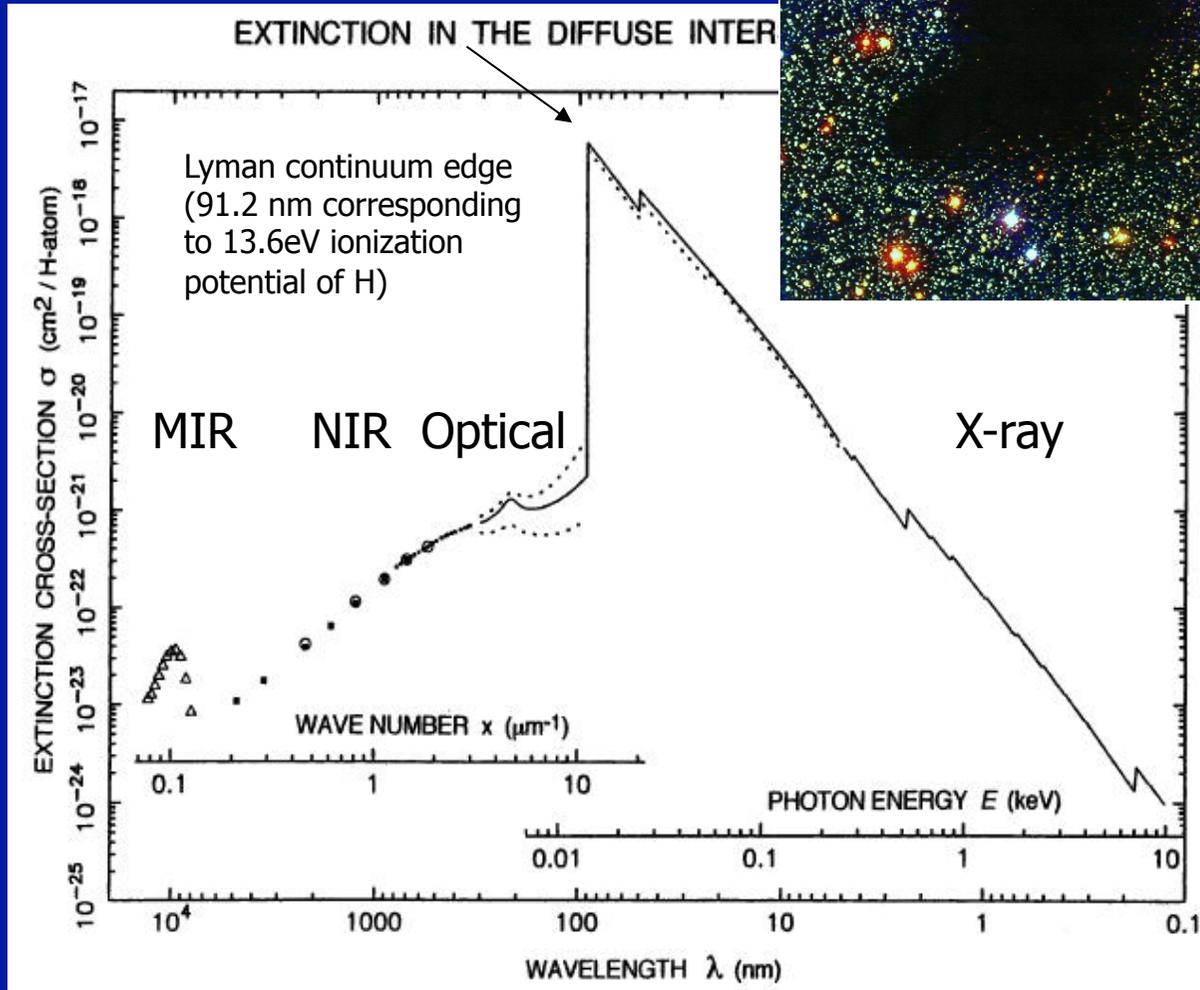
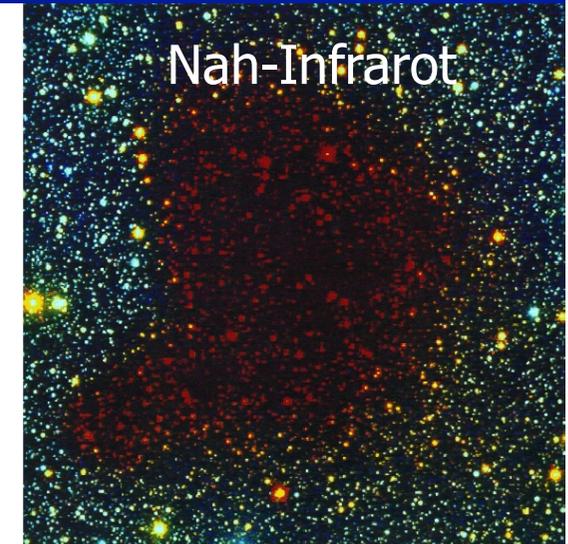
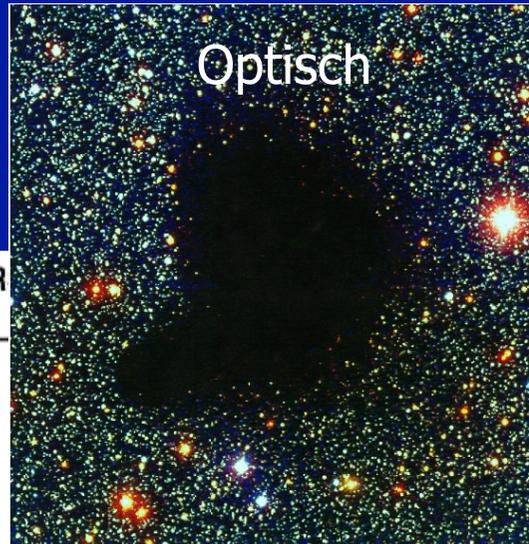
## Gas to dust mass ratio:

Canonical 1:100

Recent work suggests  
1:150 (Draine et al. 2009)

# Interstellarer Staub: Extinction bei kurzen $\lambda$

Extinktion schwächt und roetet das Licht.



Abschwächung  $dI$  der Strahlung  $I$  durch Wolke der Größe  $ds$ :

$$dI = -I \kappa ds$$

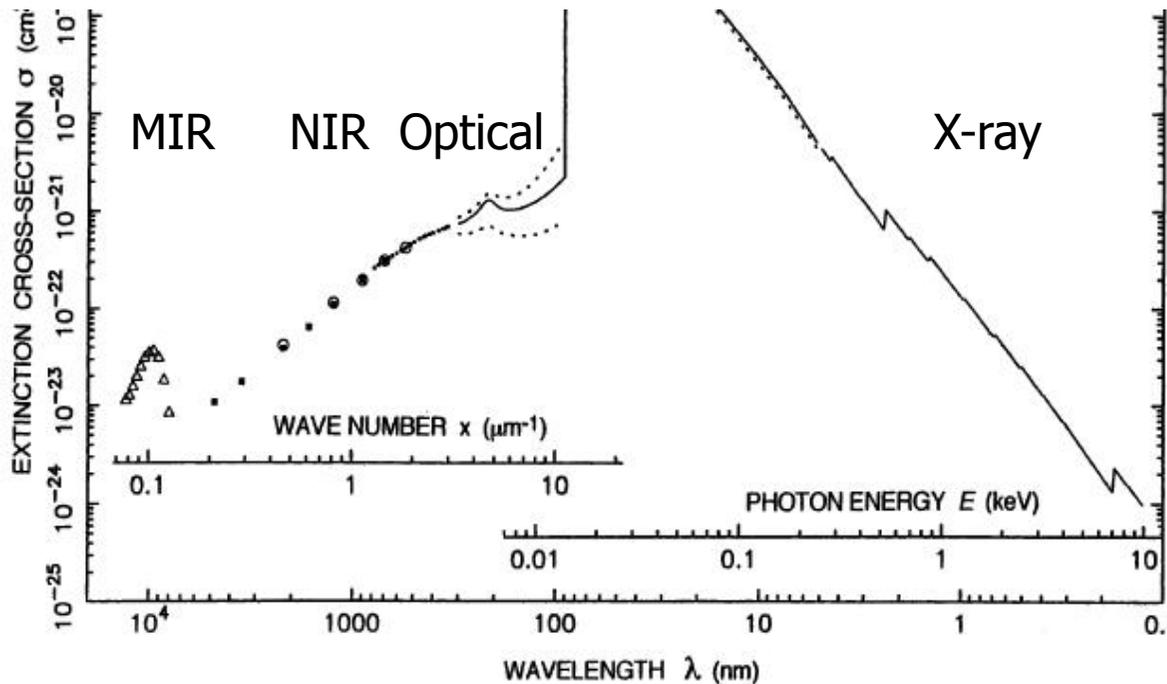
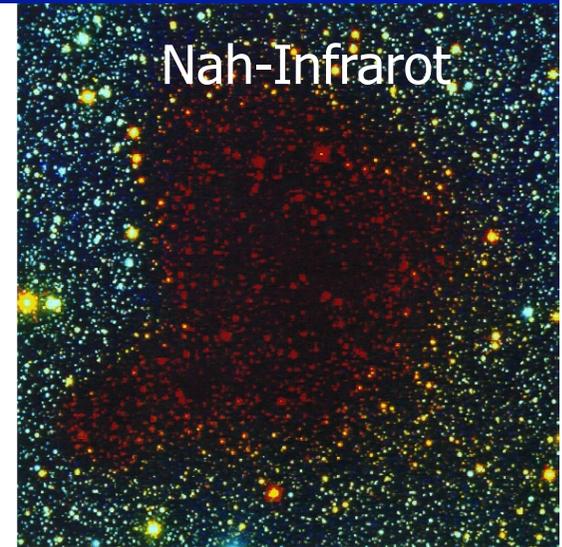
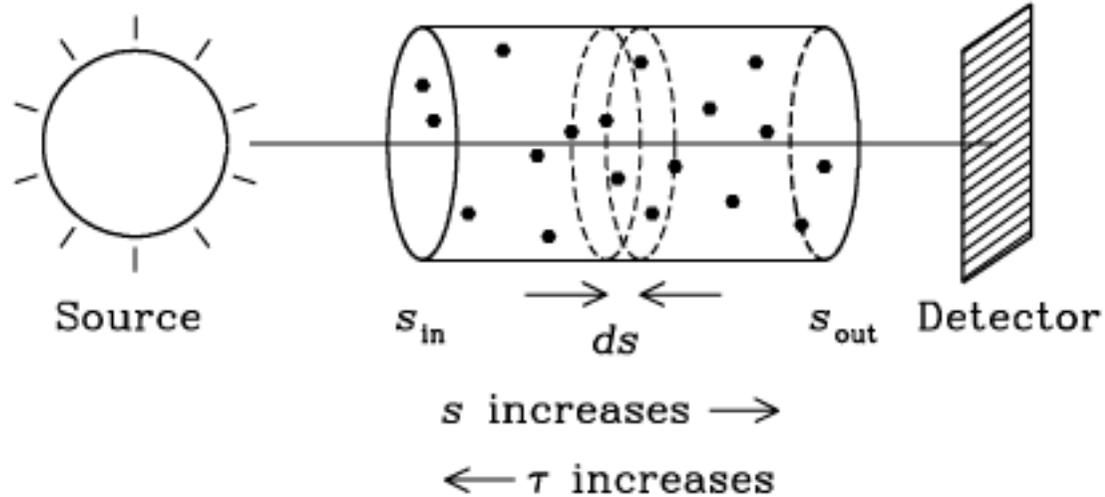
$$\Rightarrow -\int dI/I = \int \kappa ds = \tau$$

Nach Integration

$$\Rightarrow I = I_0 e^{-\tau}$$

$\kappa$  Absorptionskoeffizient  
 $\tau$  Optische Tiefe

# Interstellarer Staub: Extinction bei kurzen $\lambda$



Abschwächung  $dI$  der Strahlung  $I$  durch Wolke der Größe  $ds$ :

$$dI = -I \kappa ds$$

$$\Rightarrow -\int dI/I = \int \kappa ds = \tau$$

Nach Integration

$$\Rightarrow I = I_0 e^{-\tau}$$

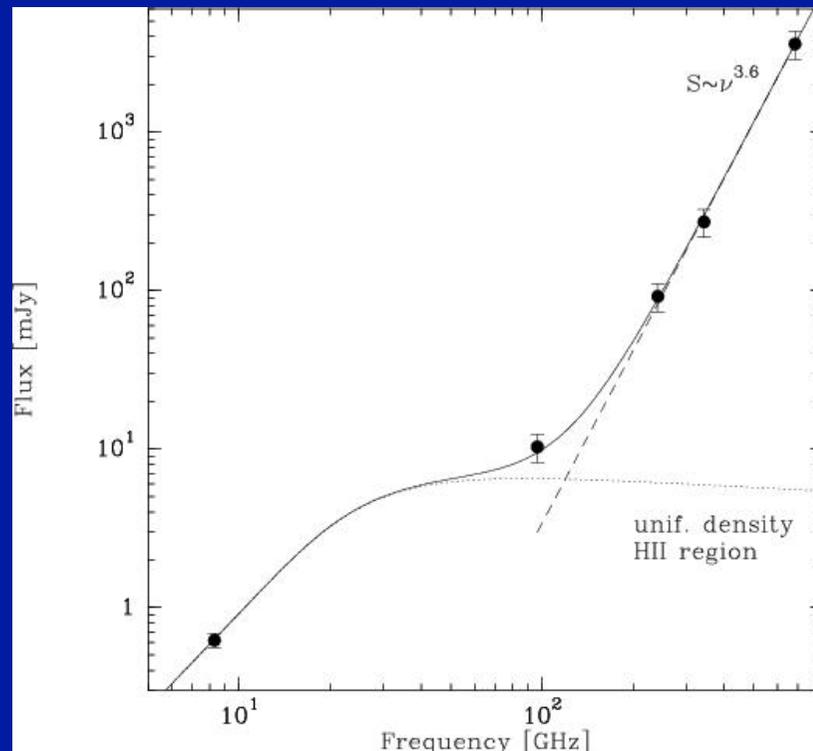
$\kappa$  Absorptionskoeffizient  
 $\tau$  Optische Tiefe

# Interstellarer Staub: Thermische Emission

$$S(\nu) = N (\sigma/D^2) Q(\nu) B(\nu, T)$$

Mit  $N$  Staubkornern, einem Querschnitt  $\sigma$  bei einer Distanz  $D$ , einer Staubemissivitaet  $Q \sim \nu^2$  und der PlanckFunction  $B(\nu, T)$ . Im Rayleigh-Jeans-Grenzfall:

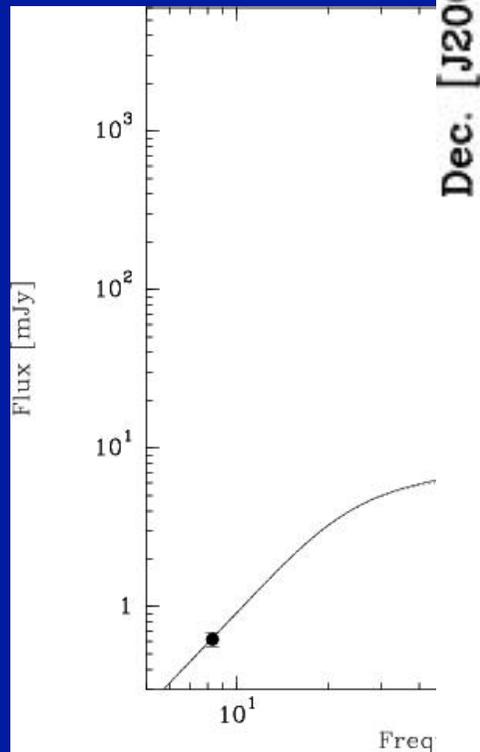
$$S(\nu) \sim \nu^4$$



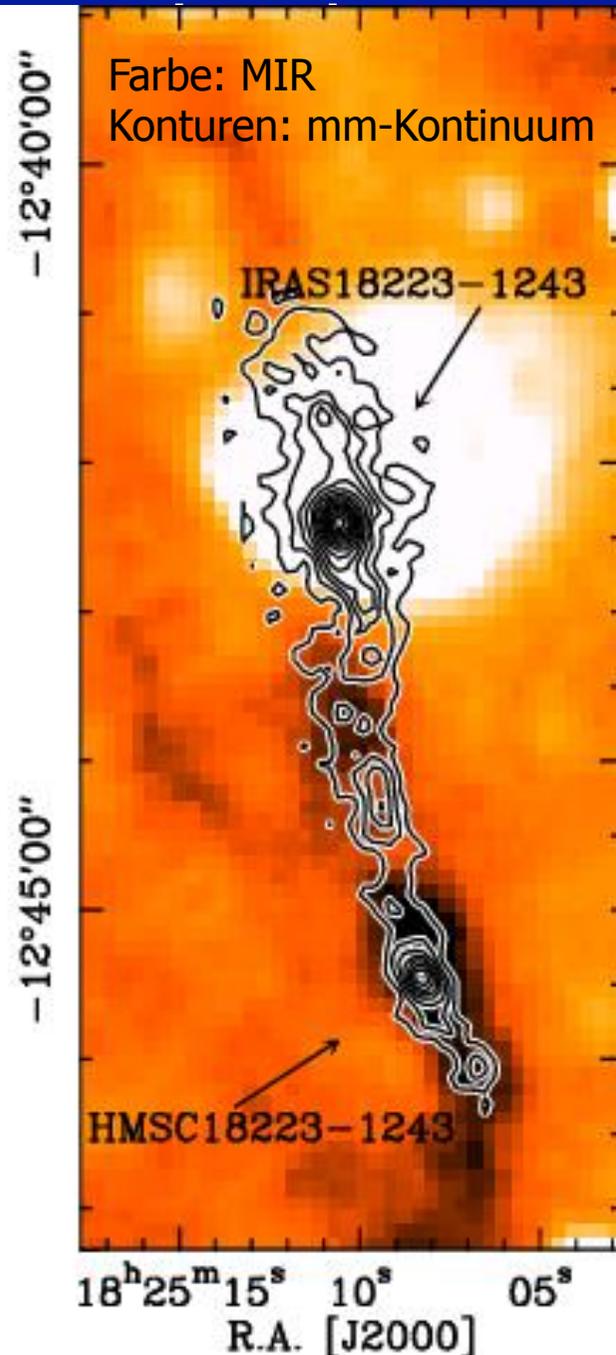
Die thermische Staubemission ist optisch duenn und direkt proportional zur Staubsaeulendichte. Mit einem Staub-zu-Gasverhaeltniss ( $\sim 1/150$ ) koennen wir dann die Gasmasse errechnen.

# Interstellare

Mit  $N$  Staubkornen  
emissivitaet  $Q \sim \nu^2$  u



Dec. [J2000]

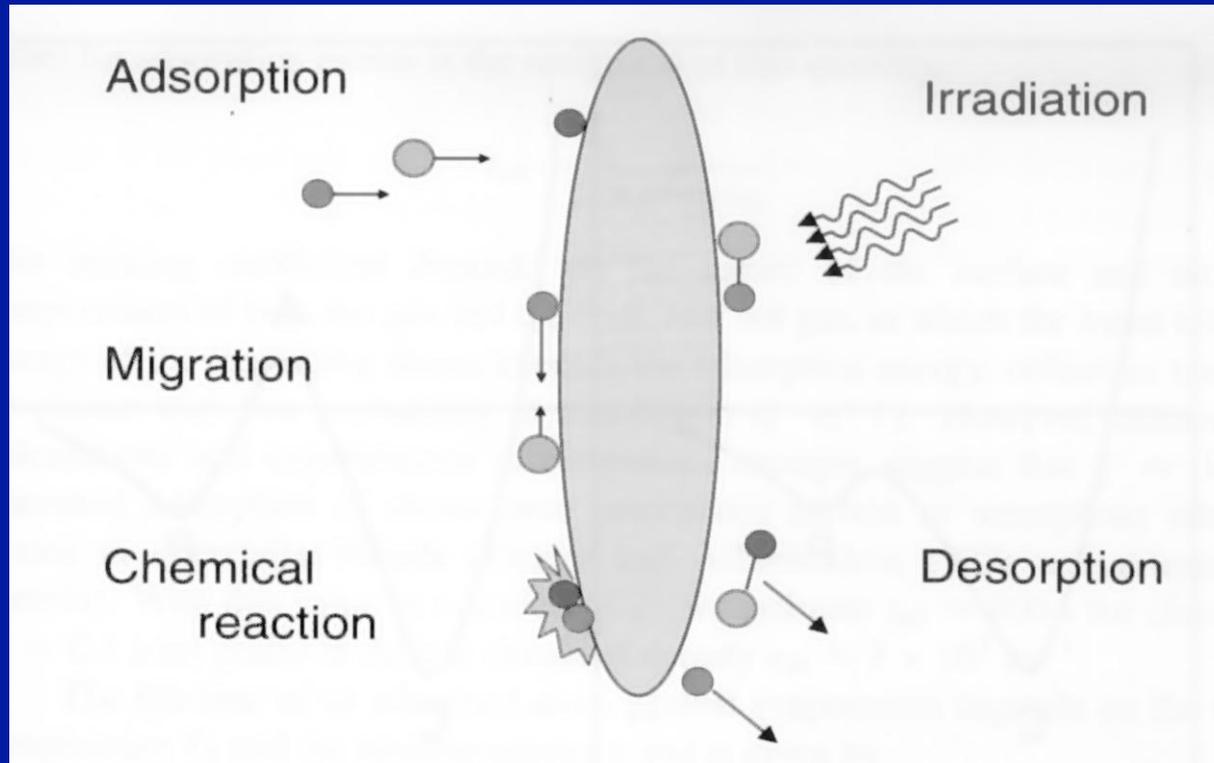


# the Emission

r Distanz  $D$ , einer Staub-  
Rayleigh-Jeans-Grenzfall:

Die Staubemission ist  
und direkt proportional  
ulendichte. Mit einem  
verhaeltniss ( $\sim 1/150$ )  
dann die Gasmasse

# Staub kann mehr ... ein chemischer Katalysator!

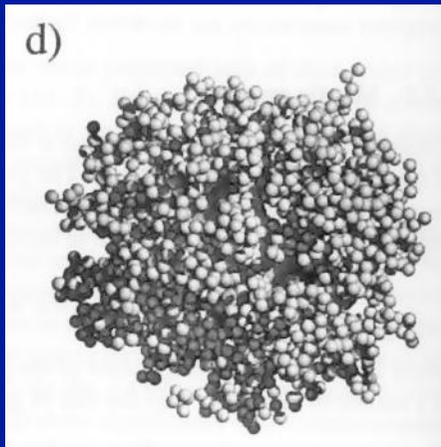
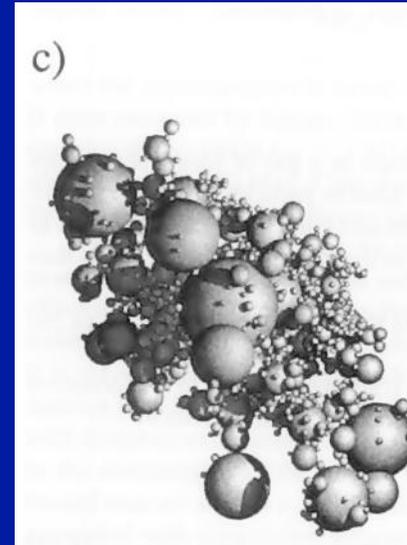
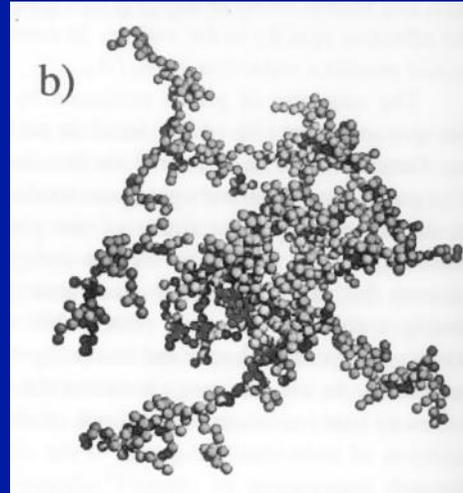
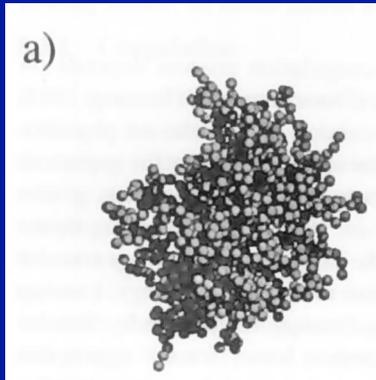


Quantentunneleffekte  
Besonders bei der  
"Wanderung" auf der  
Stauboberfläche

*Sketch der prinzipiellen Vorgänge bei der Stauboberflächenchemie.*

Dieser Pfad ist wichtig fuer die Entstehung vieler komplexer Molekuele, aber auch fuer  $H_2$ . In der Gasphase koennte  $H_2$  nur bei hohen Dichten und Temperaturen entstehen, die wir aber im normalen interstellaren Medium nicht haben.

# Dust incarnations



Im ISM sollte der Staub kompakt und klein sein. Innerhalb von dichten Akkretionsscheiben kann er aber auch koagulieren und wachsen.

Figures: Simulations of dust grain cluster growth for different initial parameters (gas and dust density, temperature, stickyness, grain charge, coagulation time ...). (From Dorschner & Henning 1995)

# Zusammenfassung

Die Hauptelemente des ISM

Grundlegendes ueber Molekuele im All

Physikalische Verteilungen im ISM

Heiz- und Kuehlprozesse

Staub

# Einfuehrung in die Astron. & Astrophysik I

Wintersemester 2013/2014: Henrik Beuther & Christian Fendt

*17.10 Einfuehrung: Ueberblick und Geschichte (H.B.)*

*24.10 Koordinatensys., Sternpositionen, Erde/Mond (C.F.)*

*31.10 Teleskope und Instrumentierung (H.B.)*

*07.11 Strahlung, Strahlungstransport (C.F.)*

*14.11 Planetensystem(e) und Keplergesetze (H.B.)*

*21.11 Sonne & Sterne, Typen, Klassifikationen, HR-Diagramm (C.F.)*

*28.11 Interstellare Materie: Chemie und Materiekreislauf (H.B.)*

**05.12 Sternentstehung, Akkretionsscheiben und Jets (H.B.)**

*12.12 Sternaufbau und Sternentwicklung: Hauptreihe (C.F.)*

*19.12 Sternaufbau und Sternentwicklung: Endstadien (C.F.)*

*26.12 und 02.01 –*

*09.01 Mehrfachsysteme und Sternhaufen, Dynamik (C.F.)*

*16.01 Exoplaneten und Astrobiologie (H.B.)*

*23.01 Die Milchstrasse (H.B.)*

*30.01 Zusammenfassung (C.F. & H.B.)*

*06.02 Pruefung (C.F. & H.B.)*